ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES INDUSTRIELLES QUILLET

Nouvelle encyclopédie pratique de mécanique, d'électricité
et d'électronique

Mécanique
Généralités - Applications



LIBRAIRIE ARISTIDE QUILLET
11 boulevard de Sébastopol, Paris 1er

AVANT-PROPOS

Après les tomes I et II consacrés : — l'un à un rappel des connaissances générales (mathématiques, mécanique des solides, physique nucléaire, magnétisme, optique, électricité, électronique, électrotechnique) et à l'étude des divers moyens de production de l'énergie électrique ; — l'autre à une description des principales applications de l'électricité, de l'électronique et de l'électrotechnique, la Librairie Aristide Quillet a réservé les tomes III et IV de son Encyclopédie des Sciences industrielles au très vaste domaine que recouvre l'appellation générale de mécanique.

Rappelons à ce propos que ce terme désigne aussi bien la partie théorique de la physique qui traite de l'équilibre et du mouvement des corps (mécanique des solides, mécanique des fluides) que toutes les techniques relatives à la construction et au fonctionnement des « machines » (en grec mêkhanê). Ces diverses disciplines ont dû être considérées tour à tour. Nous avons placé dans le tome III les parties théoriques et l'étude des machines et des techniques industrielles, et nous avons consacré le tome IV uniquement aux véhicules de transport et aux applications qui résultent de leur fabrication et de leur utilisation.

Dans le tome III il nous a tout d'abord paru nécessaire de préciser quelques notions théoriques concernant la mécanique des fluides et la résistance des matériaux, de façon à aborder dans de bonnes conditions la technologie des constructions mécaniques, c'est-à-dire, notamment, les nombreux problèmes posés par la réalisation d'assemblages ou par la transmission de divers mouvements.

Pour que cet ensemble soit cohérent nous avons également rappelé : — les éléments de base du dessin technique (méthodes retenues pour établir les documents à partir desquels peut être réalisée une fabrication) — et les principes de la métrologie et du contrôle de pièces, qui permettent la vérification de cette fabrication.

Les matériaux utilisés dans les diverses branches industrielles ont fait l'objet d'une étude approfondie. Les méthodes d'élaboration des métaux purs et de leurs alliages ont été longuement développées, car leurs utilisations sont de plus en plus diversifiées, malgré le grand développement des matières plastiques, concurrentes directes des métaux dans de nombreux cas. Par ailleurs nous leur avons réservé une grande place ainsi qu'aux caoutchoucs, naturel et synthétiques.

En ce qui concerne l'élaboration des pièces, nous avons distingué : le formage direct (moulage de métal fondu ou de poudres) et le formage mécanique, qui fait l'objet de très nombreuses techniques : découpage, emboutissage, filage par choc, repoussage, chaudronnerie, forgeage, estampage.

Par ailleurs, nous avons étudié en détail l'usinage des pièces par les diverses machines-outils (tours, fraiseuses, perceuses, raboteuses, aléseuses, etc.) et avons indiqué tous leurs perfectionnements ; en effet, si certaines de ces techniques sont très anciennes, il n'en est pas moins vrai qu'elles se sont profondément transformées et adaptées, pour répondre aux désirs des utilisateurs, pour lesquels il est nécessaire de rechercher le meilleur compromis entre des conditions caractéristiques souvent contradictoires telles que légèreté et solidité, voire esthétique et prix de revient faible.

Aussi avons-nous exposé au lecteur à la fois les techniques classiques et les techniques expérimentales (qui deviendront classiques à plus ou moins longue échéance). De même, pour l'assemblage des pièces par soudage et par collage nous ne nous sommes pas contentés d'exposer les méthodes classiques mais avons abordé les techniques d'avenir : soudage par bombardement électronique ou par plasma ; utilisation de colles aux propriétés remarquables, utilisées dans des secteurs de pointe comme l'aéronautique.

Le tome IV est spécialement réservé aux moyens de transport suivants : chemin de fer, automobile, motocyclette, aéroglisseur, avion et satellite artificiel.

En ce qui concerne les chemins de fer, il a été nécessaire de montrer l'évolution très rapide et très profonde de la traction. Alors que la traction à vapeur disparaissait, la traction électrique et la traction Diesel se généralisaient et l'on assistait à l'apparition de la turbine à gaz. Loin de se concurrencer, ces divers modes de traction se révélaient complémentaires ; les bouleversements apportés ont été si profonds qu'une étude détaillée a été réservée à chacun d'eux.

L'automobile et la motocyclette se sont aussi considérablement transformées. Le moteur thermique a fait l'objet de nombreux perfectionnements avant que l'on songe à utiliser le moteur rotatif. En même temps, de nombreux servomécanismes ont été mis en œuvre pour rendre direction, freinage ou changement de vitesse plus aisés et plus sûrs.

Dans ce même tome sont également présentés les aéroglisseurs, moyen de transport particulièrement intéressant puisqu'il permet de supprimer tout contact entre le véhicule mobile et le milieu au-dessus duquel celui-ci se déplace. Une place de choix a été réservée à l'aéronautique et aux techniques spatiales. Nous avons rendu compte le plus fidèlement possible de la rapide évolution de l'avion, ainsi que des nombreuses adaptations dont les aéronefs *font l'objet, puisque ce terme regroupe aussi bien les supersoniques que les diverses catégories d'hélicoptères.*

Ainsi les tomes III et IV de notre Encyclopédie des Sciences industrielles répondent-ils au but que nous nous étions fixé à l'origine : enseigner la « base », rendre accessible la « pointe », éveiller des vocations.

L'Éditeur



MÉCANIQUE DES FLUIDES

CHAPITRE PREMIER

STATIQUE DES FLUIDES

1. GÉNÉRALITÉS

La statique des fluides est la science qui permet d'étudier l'équilibre des fluides au repos. Un fluide est un milieu matériel constitué de particules infiniment petites pouvant se déplacer les unes par rapport aux autres : il peut subir de grandes variations de forme.

1.1. Propriétés des fluides. — À des degrés différents, les fluides sont visqueux, mobiles, isotropes et compressibles. La viscosité caractérise la difficulté des particules à glisser les unes sur les autres ou sur une paroi matérielle. La mobilité traduit la facilité de déplacement et de déformation. L'isotropie signifie que les propriétés physiques locales sont identiques dans toutes les directions.

1.2. Définitions des gaz et des liquides. — La compressibilité permet de classer les fluides en deux grandes familles : gaz et liquides.

Un gaz est essentiellement compressible : il diminue facilement de volume sous l'effet de la pression ; tout aussi expansible, il occupe intégralement le volume qui lui est offert.

Un liquide est presque incompressible : il faut des pressions considérables (1 kbar, soit 1 000 atmosphères) pour obtenir une réduction de volume extrêmement faible (quelques millièmes).

1.3. Notion de forces. — Un problème de mécanique des fluides se pose et se traite comme un problème de mécanique des solides : il est nécessaire de considérer un domaine fermé et de définir le système des forces agissant sur les particules situées à l'intérieur de ce domaine. Les principes généraux de la mécanique et de la thermodynamique s'appliquent à la masse fluide considérée et les forces qui s'exercent sur les particules sont intérieures au domaine (forces moléculaires) ou extérieures (forces de surface dues à la pression et à la viscosité, forces de volume dues à la pesanteur et à l'accélération).

1.4. Tension en un point d'un fluide. — Considérons un point M d'un fluide et une surface dS contenant ce point (fig. I-1). Appelons $\overrightarrow{dF}$ la résultante des forces exercées par le fluide situé d'un côté de l'élément de surface d'aire dS sur le fluide situé de l'autre côté. La tension $\vec{T}$ au point M du fluide en mouvement est alors définie par la relation vectorielle suivante :

$$\vec{T} = \frac{\overrightarrow{dF}}{dS}$$

Le fluide est dit *parfait* lorsque cette tension est normale à l'élément de surface dS. Cette hypothèse est toujours satisfaite lorsque le fluide est au repos.

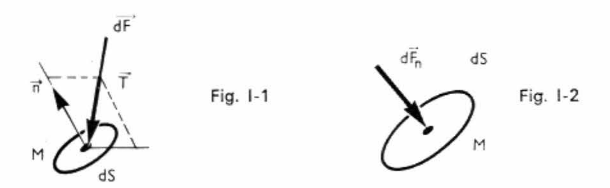


Fig. I-1   Fig. I-2

1.5. Pression en un point d'un fluide (fig. I-2). — La pression p au point M, grandeur scalaire, n'est autre que l'intensité de la composante normale à dS de la tension définie ci-dessus ; elle ne dépend que de la position de M :

$$p = \frac{dF_n}{dS}$$

Dans le système international SI, l'unité de pression est le newton par mètre carré (N/m²), appelé pascal (Pa) en France : c'est la pression exercée par une force d'un newton répartie uniformément sur une surface d'un mètre carré. En pratique, on emploie le décanewton par centimètre carré ou bar. Le tableau des unités de pression utilisées couramment (V. page suivante) donne la correspondance entre elles avec une erreur relative inférieure au millième.

2. ÉQUILIBRE DES FLUIDES AU REPOS

2.1. Équation fondamentale. — Pour établir l'équation fondamentale d'équilibre d'un fluide, considérons un domaine fermé contenant un point M défini par ses coordonnées x, y, z dans un trièdre orthonormé (O, x, y, z). Ce domaine est un parallélépipède rectangle dont les côtés dx, dy et dz sont respectivement parallèles à $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$ et $\overrightarrow{Oz}$

Principales unités de pression

(x étant le nombre lu, l'unité prise sur la ligne horizontale vaut x unités de la ligne verticale correspondante)

L'erreur relative commise est inférieure à 1/1 000	N/m² (appelé pascal en France)	** kgf/cm²	* bar (hpz) (daN/cm²)	** atm	** gf/cm² (cm CE) (1)	* mbar	** torr (mm de mercure)	in Hg	lb/sq.in (ou : psi)
1 N/m²	1	$1{,}02.10^{-5}$	10^{-5}	$0{,}986\,9.10^{-5}$	$1{,}02.10^{-2}$	10^{-2}	$7{,}5.10^{-3}$	$0{,}295\,3.10^{-3}$	$0{,}145\,1.10^{-3}$
1 kgf/cm²	$0{,}980.10^{5}$	1	0,980	0,968	1 000	980	735	28,96	14,22
1 bar * (= 1 hpz) (= 1 daN/cm²)	10^{5}	1,02	1	0,986 9	1 020	1 000	750	29,53	14,51
1 atm	$1{,}013.10^{5}$	1,033	1,013	1	1 033	1 013	760	29,95	14,70
1 gf/cm² (= 1cm CE)	98	10^{-3}	$0{,}098.10^{-2}$	$0{,}968.10^{-3}$	1	0,98	0,735	0,028 96	0,014 22
1 mbar*	100	$1{,}02.10^{-3}$	$0{,}1.10^{-2}$	$0{,}986\,9.10^{-3}$	1,02	1	0,750	0,029 53	0,014 51
1 torr (= 1 mm de mercure)	133,3	$1{,}36.10^{-3}$	$0{,}133\,3.10^{-2}$	$1{,}315.10^{-3}$	1,36	1,333	1	0,039 37	0,019 34
1 in Hg	3 386	0,034 53	$3{,}386.10^{-2}$	0,033 45	34,53	33,86	25,4	1	0,491 0
1 lb/sq.in (ou : 1 psi)	6 890	0,070 3	$6{,}89.10^{-2}$	0,068	70,3	68,947	51,75	2,041	1

NOTA. ☐ Unités dont l'emploi est recommandé (Recommandation ISO/R. 1 000 — 1969 (F)).
* Autres unités pouvant être employées. ** Unités dont l'usage est toléré. (1) Centimètre de colonne d'eau.

(fig. I-3). Il est en équilibre quand la somme des forces extérieures qui lui sont appliquées est nulle. Parmi celles-ci nous trouvons :

— une force de volume,

— les forces dues à la pression exercée par le fluide sur les surfaces latérales du domaine élémentaire considéré.

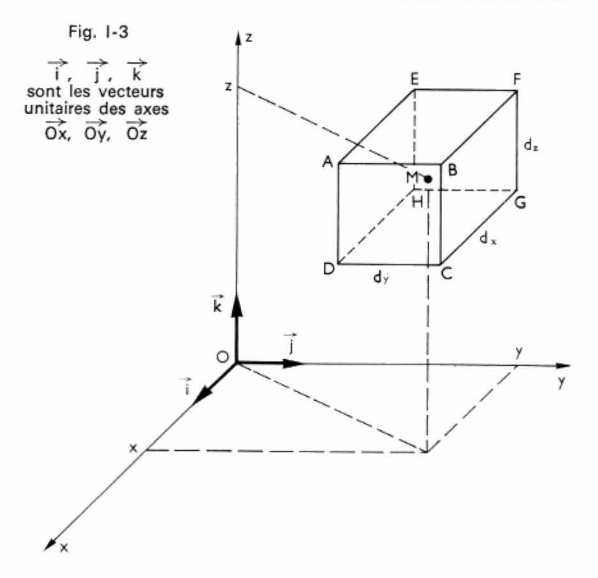


Fig. I-3
$\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ sont les vecteurs unitaires des axes $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$, $\overrightarrow{Oz}$

Pour un fluide de masse volumique ρ, dans lequel la force de volume par unité de masse est désignée par $\vec{F}$, la force de volume est égale à :

$$\rho\, F\, dx\, dy\, dz$$

($dx\ dy\ dz$ représente le volume du domaine élémentaire considéré).

En ce qui concerne les forces dues à la pression, elles sont normales aux faces du parallélépipède et dirigées vers l'intérieur de celui-ci. Nous devons donc seulement déterminer les forces qui s'exercent selon les trois directions $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$ et $\overrightarrow{Oz}$ du trièdre de référence. Dans chacune de ces directions, ces forces admettent une résultante d'intensité égale au produit de la différence des pressions s'exerçant sur les deux faces normales à l'axe considéré et de l'aire commune de ces faces. Ainsi, en désignant respectivement par dp_x dp_y et dp_z les différences des pressions sur les faces du domaine respectivement perpendiculaires à $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$ et $\overrightarrow{Oz}$, ces intensités sont égales à :

— $dp_x\ dy\ dz$ pour la force dirigée selon l'axe $\overrightarrow{Ox}$

— $dp_y\ dz\ dx$ pour la force dirigée selon l'axe $\overrightarrow{Oy}$

— $dp_z\ dx\ dy$ pour la force dirigée selon l'axe $\overrightarrow{Oz}$

L'équation d'équilibre prend donc la forme suivante :

$$\rho\vec{F}\, dx\, dy\, dz - [dp_x\, dy\, dz\vec{i} + dp_y\, dz\, dx\vec{j} + dp_z\, dx\, dy\, \vec{k}] = 0$$

ou (en divisant par $dx\ dy\ dz$) :

$$\rho\vec{F} - \left[\frac{dp_x}{dx}\vec{i} + \frac{dp_y}{dy}\vec{j} + \frac{dp_z}{dz}\vec{k}\right] = 0$$

Lorsque dx, dy et dz tendent simultanément vers une valeur nulle, les rapports considérés dans la parenthèse ci-dessus tendent vers des valeurs déterminées (respectivement $\frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial y}$ et $\frac{\partial p}{\partial z}$), appelées dérivées partielles de la pression p par rapport aux variables x, y et z. L'expression précédente prend alors la forme suivante :

$$\rho\vec{F} - \left[\frac{\partial p}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z}\vec{k}\right] = 0$$

L'expression entre parenthèses représentant la grandeur vectorielle, appelée *gradient de pression* ($\overrightarrow{\text{grad}}\ p$), cette équation est souvent écrite sous la forme suivante :

$$\rho\vec{F} - \overrightarrow{\text{grad}}\ p = 0$$

Si la force $\vec{F}$ admet pour composantes X, Y et Z respectivement selon les axes $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$ et $\overrightarrow{Oz}$, à la relation vectorielle précédente, il est possible de faire correspondre trois équations différentielles :

$$\rho X - \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$\rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

Par ailleurs, lorsque les forces de volume $\vec{F}$ dérivent d'un potentiel ($\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}\ U$) la condition d'équilibre s'écrit :

$$\rho . \overrightarrow{\text{grad}}\ U + \overrightarrow{\text{grad}}\ p = 0$$

Les surfaces isobares ($p =$ Cte) et les surfaces équipotentielles ($U =$ Cte) sont alors confondues et sont normales aux vecteurs $\overrightarrow{\text{grad}}\ p$.

2.2. Hydrostatique. — C'est la statique des fluides incompressibles dans le champ de la pesanteur. La température θ, la masse volumique ρ et la force de volume, qui est ici la force de pesanteur (poids) sont des constantes. Le poids par unité de masse dérive du potentiel $U = g\,z$; g est l'intensité de l'accélération de la pesanteur et z la cote altimétrique. L'équation du paragraphe 2.1 peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\overrightarrow{\text{grad}}\ (p + \rho\, g\, z) = 0$$

Par l'intégration nous obtenons l'*équation de l'hydrostatique :*

$$p + \rho\, g\, z = \text{Cte}$$

Les propriétés suivantes en résultent :

1° Les surfaces isobares sont des plans horizontaux ($p =$ Cte si $z =$ Cte).

2° La différence de pression existant entre deux points A et B ne dépend que de leur différence d'altitude

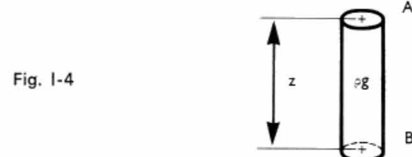


Fig. I-4

($z_B - z_A$) et du poids volumique $\bar{\omega} = \rho g$ du fluide considéré (fig. I-4) :

$$p_B - p_A = \bar{\omega}(z_B - z_A)$$

3° La surface de séparation de deux liquides non miscibles et sans réaction chimique réciproque est un plan horizontal.

4° Dans chacun des vases de formes quelconques de la figure I-5, communiquant entre eux et contenant un même liquide en équilibre, la surface libre est dans un même plan horizontal : c'est le principe des vases communicants.

5° Les pressions se transmettent intégralement et instantanément : c'est le principe de Pascal.

2.3. Aérostatique. — C'est la statique des fluides compressibles dans le champ de la pesanteur. Le gaz a une masse volumique ρ fonction de sa pression p et de sa température θ, c'est l'équation thermodynamique du fluide, dite équation d'état : $\rho = f\,(p, \theta)$.

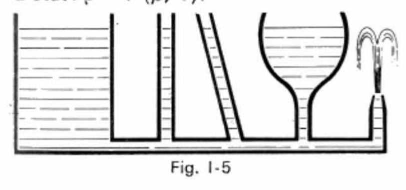


Fig. I-5

Fig. I-7

Lorsque le gaz subit une transformation infiniment petite, la variation de masse volumique $d\rho$ est liée à la variation de pression dp correspondante :

$d\rho = \rho . \chi . dp$ (χ, coefficient de compressibilité, dépend du type de la transformation ; pour une transformation isotherme χ est égal à $\dfrac{1}{p}$; pour une transformation adiabatique réversible $\chi = \dfrac{1}{\gamma p}$, γ étant le rapport des chaleurs massiques à pression constante et à volume constant).

La loi de Laplace, écrite sous forme différentielle : $dp = -\rho\, g\, dz$, permet de calculer la pression de l'atmosphère en fonction de l'altitude et de l'évolution de la température (il faut connaître ρ_0, p_0 et g_0 au lieu considéré défini pour l'altitude z_0). À température constante nous pouvons écrire :

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0}\, g_0\, dz$$

À température variable, en adiabatique réversible il vient :

$$dp = -p^{\frac{1}{\gamma}}\, \frac{\rho_0}{p_0}\, g_0\, p_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\, dz$$

2.4. Statique d'un liquide dans d'autres champs de forces. — L'équilibre des liquides n'a été étudié ci-dessus que dans le champ de la pesanteur. Une composante horizontale de l'accélération apparaît dans les cas suivants :

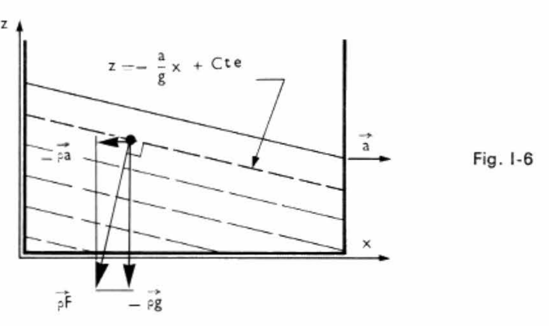


Fig. I-6

1° Liquide pesant contenu dans un récipient soumis à une accélération uniforme $\vec{a}$ (fig. I-6) ; les surfaces isobares sont des plans inclinés parallèles à la surface libre du liquide :

$$z = -\frac{a}{g}\, x + \text{Cte}$$

2° Liquide pesant contenu dans un réservoir en rotation uniforme autour d'un axe vertical (fig. I-7) ; les surfaces isobares sont des paraboloïdes de révolution :

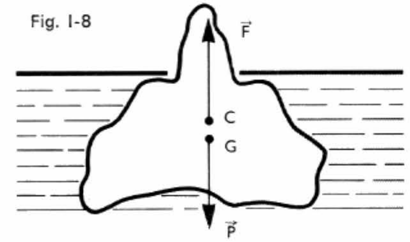
$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + \text{Cte}$$

3. APPLICATIONS

3.1. Principe d'Archimède

1° *Cas général :* tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale de bas en haut égale au poids du volume de fluide déplacé et le centre de poussée C est au centre de gravité de ce volume. Quand le centre de gravité G coïncide avec le centre de poussée C, l'équilibre est indifférent : il n'est stable que si C est sur la verticale de G et au-dessus de celui-ci. La distance GC s'appelle hauteur

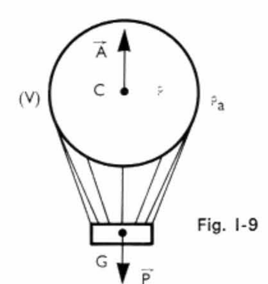
Fig. I-8

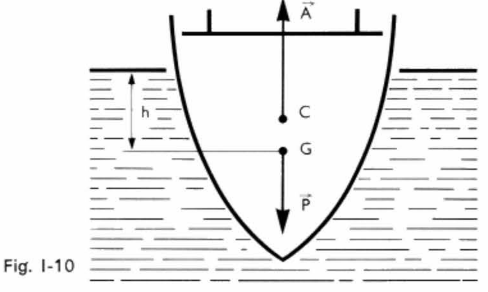


métacentrique et caractérise la stabilité statique du corps : tel est le cas de l'iceberg (fig. I-8).

2° *Force ascensionnelle :* un ballon (fig. I-9) contenant une masse de gaz (ρV) déplace de l'air de masse volumique ρ_a. Il est soumis à son poids propre et à la poussée d'Archimède ; la différence, au volume de l'enveloppe près et compte tenu du sens positif de la résultante lorsqu'elle est dirigée vers le haut, est égale à :

$$F = A - P = \rho_a . V . g - \rho . V . g = \rho_a . V . g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_a}\right)$$





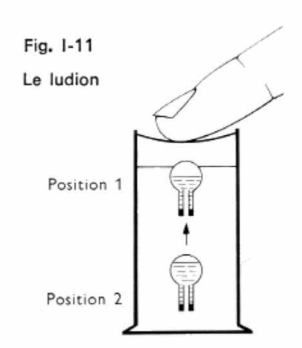


Fig. I-11
Le ludion

$\frac{\rho}{\rho_a}$ étant la densité d du gaz par rapport à l'air (0,07 pour l'hydrogène et 0,14 pour l'hélium), la force ascensionnelle est donc proportionnelle à $(1 - d)$.

3° *Bateau :* il flotte si sa masse volumique moyenne ρ_b est inférieure à celle de l'eau ρ_e et la poussée d'Archimède A est égale au poids du bateau P :

$$A = \rho_e \, V_e \, g = P = \rho_b \, V_b \, g$$

avec : V_e, volume de l'eau déplacée ; V_b, volume total du bateau et : g, accélération de la pesanteur (fig. I-10).

4° *Ludion :* constitué d'un corps ouvert à la base, il contient de l'air et de l'eau. Ce jouet, convenablement lesté, est plongé dans l'eau d'un vase fermé par une membrane élastique. Au repos, le ludion émerge de l'eau (fig. I-11 : position 1) ; quand la pression de l'air augmente par action sur la membrane, l'eau pénètre dans le ludion et celui-ci descend (position 2).

3.2. Principe de Pascal

1° *Presse hydraulique* (fig. I-12) : les appareils de levage, les freins et les vérins hydrauliques sont des amplificateurs d'efforts. La pression p, due à l'application d'une force F_1 sur une section S_1, est transmise à une section S_2 bien plus grande et la force F_2 obtenue peut avoir une intensité importante :

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$$

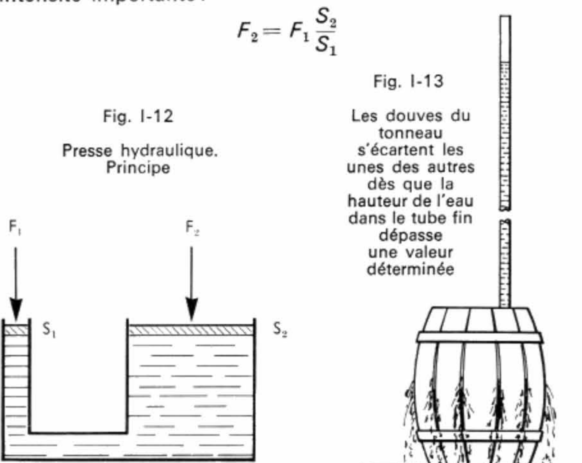


Fig. I-12
Presse hydraulique. Principe

Fig. I-13
Les douves du tonneau s'écartent les unes des autres dès que la hauteur de l'eau dans le tube fin dépasse une valeur déterminée

2° *Tonneau de Pascal* (fig. I-13) : il illustre bien cette transmission d'une pression. Une pression importante est obtenue avec une très faible quantité de liquide : le tonneau est surmonté d'un tube fin d'une grande hauteur et la pression p qui s'exerce sur chaque douve a pour valeur $\rho . g . h$. Pour de l'eau et si $h = 10$ m, elle vaut 1 daN/cm² ou 10 000 daN/m², soit environ 1 bar.

3° *Barrage :* la retenue des eaux par des parois verticales met en jeu des forces considérables. Soit une écluse de largeur $l = 10$ m, avec une différence de niveau h de 8 m entre les biefs amont et aval (fig. I-14) ; la force exercée sur les portes est égale à :

$$F = \int_0^h \rho . g . l . z . dz = \rho . g . l . \frac{h^2}{2} = 320\,000 \text{ daN}$$

et le centre de poussée P est situé aux deux tiers au-dessous de la surface libre.

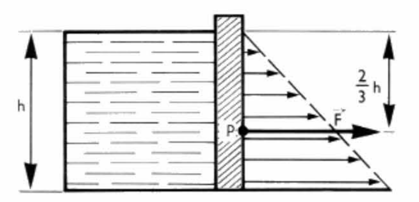


Fig. I-14
Poussée exercée par l'eau sur les portes d'une écluse

3.3. Tension superficielle et capillarité. — Dans un fluide au repos, chaque molécule est soumise aux forces que les molécules voisines exercent sur elle et l'agitation moléculaire fait que statistiquement la résultante de ces forces est nulle. À la surface libre ou à la surface de séparation de deux liquides non miscibles, la résultante de ces forces n'est plus nulle : elle est normale à cette surface de séparation. C'est la tension superficielle A dont l'unité SI est le newton par mètre (N/m).

Conséquences :

1° *Au voisinage d'une paroi,* la surface libre d'un liquide au repos n'est plus horizontale ; pour un liquide *mouillant* comme l'eau, il se forme un ménisque concave et le niveau à la paroi est supérieur au niveau moyen ; pour un liquide *non mouillant* comme le mercure, le ménisque est convexe et le niveau à la paroi est inférieur au niveau moyen.

2° *Loi de Jurin* (fig. I-15 a et b) ; pour un tube capillaire ou très fin, la différence de niveau h est proportionnelle

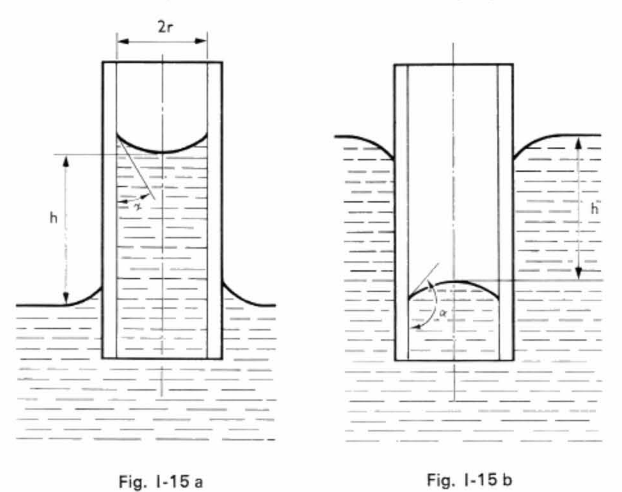


Fig. I-15 a

Fig. I-15 b

à la tension superficielle A, inversement proportionnelle à la masse volumique ρ et au rayon r du tube :

$$h = \frac{2\,A}{\rho . g . r} \cos \alpha$$

(α est l'angle entre la paroi et la tangente au ménisque au point de contact, et g est l'accélération de la pesanteur). Pour l'eau, la tension superficielle A est égale à 0,074 N/m et dans un tube de 2 mm de rayon la différence de niveau atteint 7,4 mm (si le tube et l'eau sont propres : $\alpha \approx 0$).

3.4. Siphons

1° *Le siphon de vidange* est un tube rigide ou souple, qui sert à transvaser les liquides (fig. I-16) : une extrémité plonge dans le récipient *A*, l'autre dans le récipient *B*. À l'amorçage il faut vaincre la différence de pression Δp entre la surface libre du récipient *A* et le point le plus haut du siphon et ensuite celui-ci reste amorcé tant que la différence de cotes Δz des surfaces libres est suffisante pour vaincre Δp : ainsi, dans le cas du sous-tirage (à la pression atmosphérique) du liquide d'une bonbonne pour le mettre en bouteille, il faut : $\Delta z > \Delta h \frac{\rho_a}{\rho}$, avec : $\frac{\rho_a}{\rho}$, rapport des masses volumiques de l'air et du liquide.

Fig. I-16

Fig. I-17 — Siphon. La pression p_C a été supposée supérieure à p_M

2° *Le siphon, obturateur hydraulique*, sépare deux enceintes (fig. I-17) : il permet l'écoulement et interdit le retour d'air vicié. Il est efficace tant que la pression dans la canalisation, p_C, est inférieure à celle du milieu à protéger p_M, augmentée de la pression correspondant à la hauteur *h* du liquide de masse volumique ρ placé dans le siphon :

$$p_C \leqslant p_M + \rho \cdot g \cdot h$$

4. MESURE DES DENSITÉS

Les aréomètres et densimètres mettent en œuvre le principe d'Archimède.

4.1. Aréomètre à poids constant. — Il s'enfonce plus ou moins suivant la masse volumique du liquide dans lequel il plonge. Le densimètre (fig. I-18), gradué en densité, permet une lecture directe (le repère 1 correspond à l'eau pure). Les pèse-acides, pèse-alcools et lactomètres servent à mesurer la concentration des solutions (aréomètres Baumé).

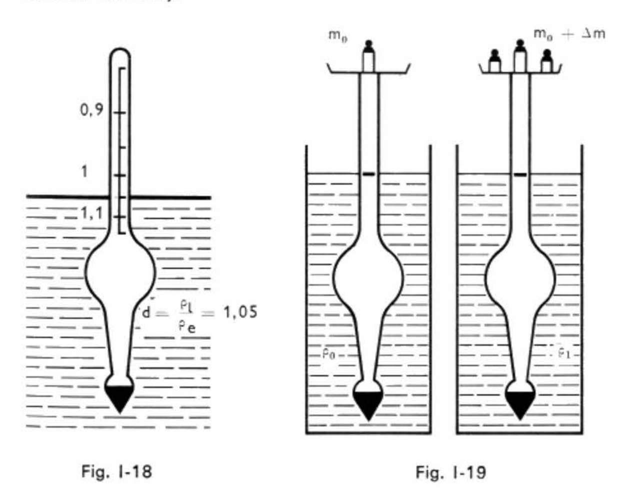


Fig. I-18

Fig. I-19

4.2. Aréomètre à volume constant (fig. I-19). — Son volume immergé V_0 doit rester constant (aréomètre Fahrenheit) : pour amener le repère au niveau du liquide, on dispose des masses marquées sur un plateau. Après avoir été chargé lorsqu'il est plongé dans un liquide de masse volumique ρ_0 connue, il est plongé dans le liquide à étudier ; les masses ajoutées (ou retranchées) permettent de calculer la masse volumique de ce liquide :

$$\rho_1 = \rho_0 + \frac{\Delta m}{V_0}$$

5. MESURE DES PRESSIONS

5.1. Manomètres à colonne de liquide

1° *Manomètre à tube en U :* fixé sur une planchette graduée disposée verticalement, le tube contient un liquide de densité connue. Cet appareil permet de comparer les pressions s'exerçant sur chacune des surfaces libres (fig. I-20) : $p_A - p_B = \rho \cdot g \cdot h$. Les liquides utilisés sont l'eau, l'alcool, le kérosène ou le phtalate de butyl ; le mercure, liquide au-dessus de — 36 °C, est également employé.

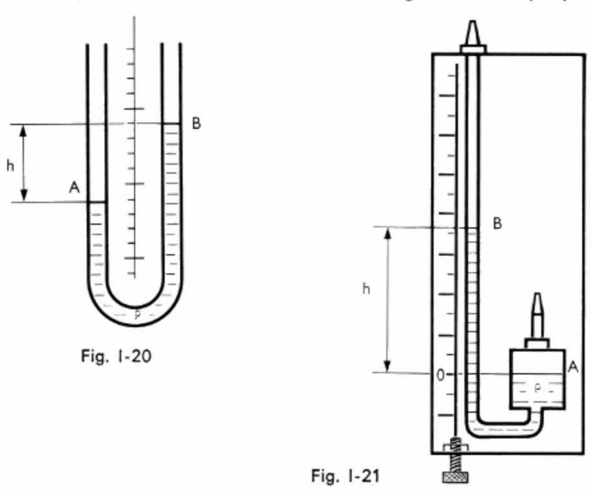


Fig. I-20

Fig. I-21

2° *Manomètre à branche verticale unique :* il donne une lecture directe de la différence de pression $p_A - p_B$, à condition d'avoir, soit un réservoir dont la surface libre reste au même niveau (comme pour le baromètre, fig. I-23) quelle que soit la hauteur de la colonne, soit une graduation mobile dont le zéro est amené au niveau de la surface libre du réservoir (fig. I-21).

3° *Manomètre incliné* (fig. I-22) : il a été conçu pour accroître la sensibilité des manomètres ; il est destiné à la mesure de faibles pressions et est gradué en millimètres de colonne d'eau (1 mmCE $\approx 10^{-4}$ bar) :

$$p_A - p_B = \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Pour un appareil déterminé, $\rho \sin \alpha$ demeure constant si le liquide utilisé a une masse volumique constante dans l'intervalle de température où il est utilisé.

4° *Baromètre* (fig. I-23) : c'est un manomètre destiné à mesurer la valeur absolue de la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface libre du réservoir, alors que le

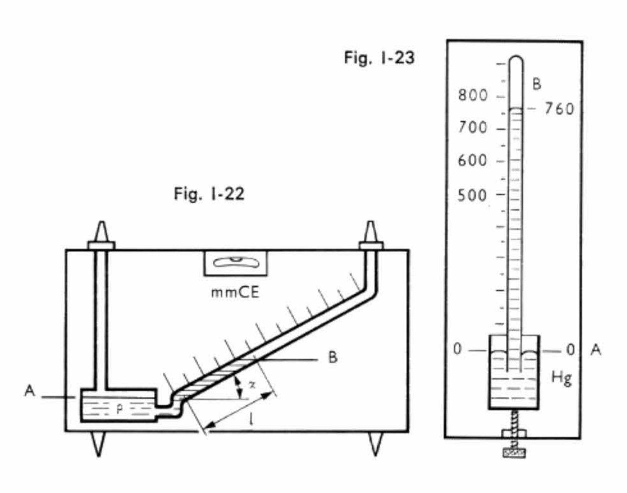


Fig. I-23

Fig. I-22

vide règne en *B*, au-dessus du mercure. Au niveau de la mer et dans les conditions de l'atmosphère normale, on observe une dénivellation de 760 mm de mercure.

5° *Jauge manométrique* (fig. I-24) : c'est un manomètre à mercure permettant la mesure de très faibles pressions (vide poussé : 10^{-7} à 10^{-9} bar). Il comporte trois branches : B_1, de volume V et de section s ; B_2, réservoir toujours en communication avec le fluide à la pression à

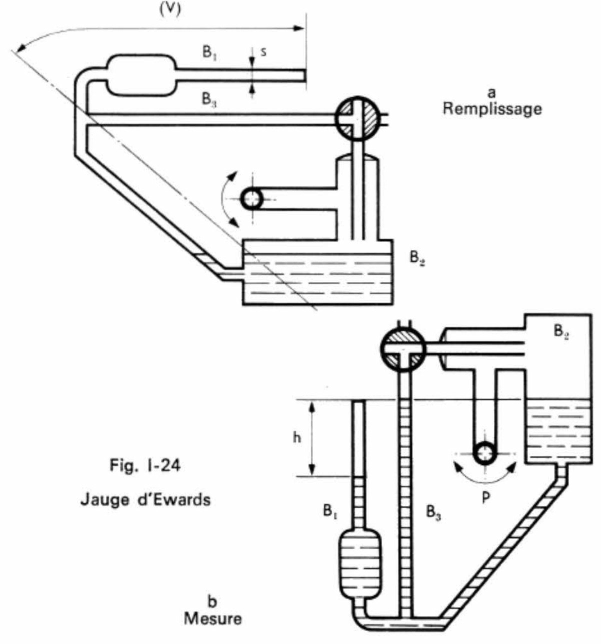


Fig. I-24

Jauge d'Ewards

mesurer p et B_3 également soumis à la pression p (ou à la pression atmosphérique). Par un mouvement de translation (jauge de Mac Leod) ou de rotation (jauge d'Ewards), le gaz est d'abord introduit dans la branche B_1 ; par le mouvement inverse, il y est emprisonné puis comprimé (compression isotherme). La loi de Mariotte permet d'écrire :

$$p = kh^2$$

avec $k = \frac{\rho_m \cdot g \cdot s}{V}$ (ρ_m : masse volumique du mercure)

5.2. Manomètres à déformation élastique

1° *Capsules manométriques :* déformables, dites anéroïdes puisque n'utilisant pas un liquide, elles sont constituées par un empilement de plusieurs soufflets (fig. I-25), dont les fonds sont soumis à la pression à mesurer, ou par une spirale métallique creuse (fig. I-26) ; un système mécanique de précision (amplificateur de déplacement) leur est généralement associé. Ces appareils sont robustes, d'emploi facile, mais sensibles aux vibrations.

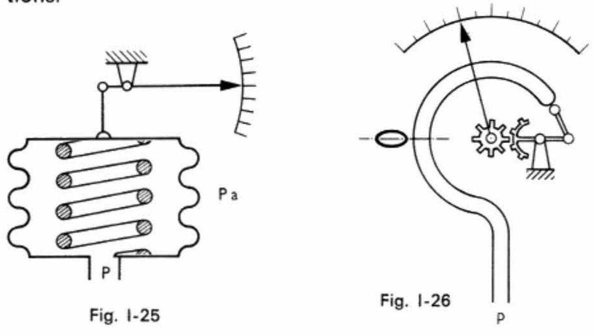


Fig. I-25

Fig. I-26

2° *Capsules à jauges extensométriques* (fig. I-27) : les contraintes, développées dans les parois de cavités métalliques soumises à la pression (ou à la différence de pression) à mesurer, sont transmises aux jauges *J* collées sur ces parois et la résistance électrique des jauges, fonction de la pression, est mesurée au moyen d'un pont de

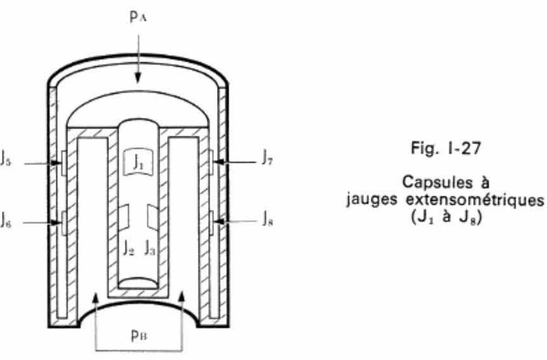


Fig. I-27

Capsules à jauges extensométriques (J_1 à J_8)

Wheatstone. Ces capteurs sont fiables, insensibles aux vibrations et accélérations mais parfois sensibles aux effets thermiques (V. t. 2, Mesures et appareils de mesure, chap. 20).

5.3. Autres procédés. — Ces procédés mettent en œuvre des propriétés physiques de la matière.

1° *Capteurs piézoélectriques* (fig. I-28) : une pastille, en quartz, céramique ou ferrite, est constituée d'atomes (fig. I-29) dont l'organisation et les positions sont bien déterminées au repos ; sous l'effet de la pression, d'infimes déplacements relatifs de ces atomes font apparaître des

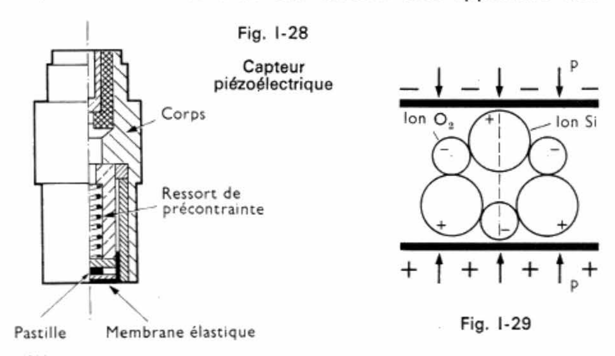


Fig. I-28

Capteur piézoélectrique

Fig. I-29

différences de potentiel qui sont appliquées à un circuit électrique. Ces capteurs, très robustes et d'utilisation facile, ont un temps de réponse voisin de la microseconde et une étendue de mesure de 0 à plus de 100 bars. Quelques précautions sont à prendre pour le transfert des charges électriques : propreté des prises, capacité des câbles, influence des accélérations.

2° *Manomètres à thermocouples* (fig. I-30) : composés de deux fils *AB* et *CD* de nature différente soudés en *M*, ils sont alimentés en *AC* et la tension mesurée en *BD* est fonction de la pression. Ces appareils, étalonnés par rapport à une jauge connue, sont utilisés de 10^{-3} à 10^{-7} bar (soit de 1 à 10^{-4} mm . Hg).

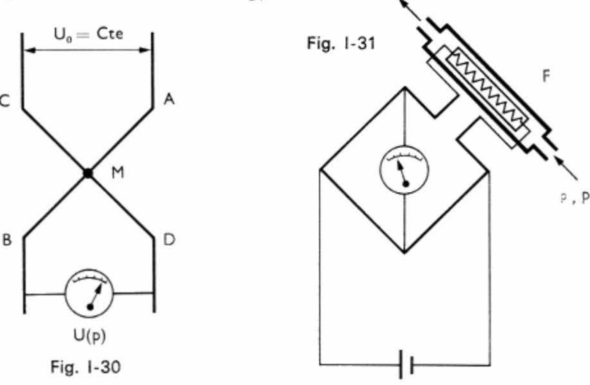
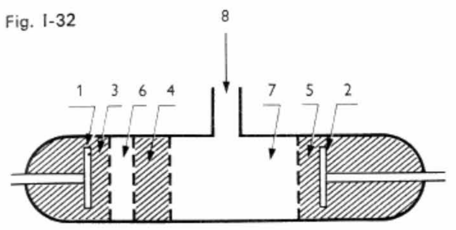


Fig. I-30

Fig. I-31

3° *Jauge de Pirani* (fig. I-31) : elle utilise la convection naturelle pour refroidir un fil de tungstène *F*, ou une thermistance, parcouru par un courant électrique. Le refroidissement et la résistance du fil (monté dans un pont de Wheatstone) sont fonction de la masse volumique ρ du

Fig. I-32



1 : cathode
2 : anode
3-4-5 : espaces sombres de Crookes, de Faraday et anodique
6-7 : lumières cathodique et anodique
8 : arrivée du gaz

Fig. I-33

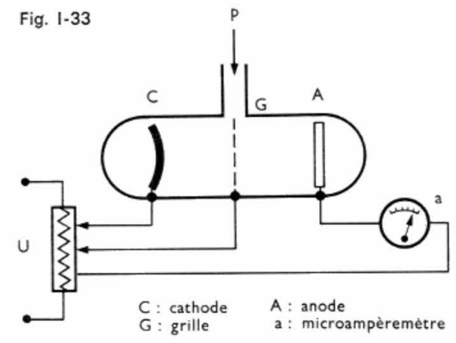
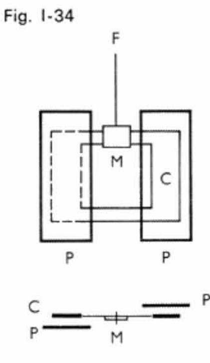


Fig. I-34



gaz et donc de la pression p. Cette jauge permet de mesurer des pressions de 10^{-8} bar (10^{-5} mm . Hg).

4° *Manomètre à décharge* (fig. I-32) : pour la mesure de pressions de 10^{-3} à $4 . 10^{-5}$ bar, on observe la décharge lumineuse entre les deux électrodes d'un tube à gaz. La longueur d'un espace sombre entourant la cathode (espace sombre de Crookes) est fonction de la pression du gaz.

5° *Manomètre à ionisation* (fig. I-33) : il sert à mesurer des pressions p jusqu'à 10^{-11} bar. C'est une triode dont on mesure le courant anodique (électrons émis par la cathode et recueillis par l'anode) qui est fonction de la pression p ; la grille permet d'ajuster la sensibilité dans la gamme de pression choisie.

6° *Jauge de Knudsen* (fig. I-34) ; c'est une balance constituée d'un cadre extrêmement léger C, suspendu à un fil de torsion F et équipé d'un miroir M ; ce cadre fait face à de plaques chauffées P. Elle permet de mesurer des pressions de 10^{-10} bar, pour lesquelles l'énergie de rebondissement des molécules est fonction de la température des parois sur lesquelles elles rebondissent : le nombre d'impacts est d'autant plus grand que leur nombre est important, donc que la pression est grande.

6. PRODUCTION DES PRESSIONS

6.1. Basses pressions - Technique du vide. — L'extraction du gaz d'un récipient pour le refouler dans un autre ou l'évacuer vers l'atmosphère est réalisée au moyen de pompes, qui peuvent être associées en série. La pompe alternative à piston, du fait des jeux et des volumes résiduels, n'est pratiquement plus utilisée.

1° *Pompe à palettes* (fig. I-35) : elle permet d'obtenir un vide de 10^{-6} bar. Constituée d'un corps de pompe Co contenant une cavité cylindrique C, elle comporte un rotor R qui tourne autour d'un axe A différent de celui de C et tel que le rotor soit tangent en T à C. Le rotor est équipé de deux palettes P_1 et P_2 repoussées par le ressort K. Le corps est traversé par les tubulures d'aspiration et de refoulement, Ta et Tr. La rotation du rotor entraîne une augmentation du volume V_1, qui provoque l'aspiration du gaz, et une diminution du volume V_2 dans lequel le gaz est comprimé : il s'échappe lorsque la pression en V_2 est suffisante pour soulever la soupape de refoulement.

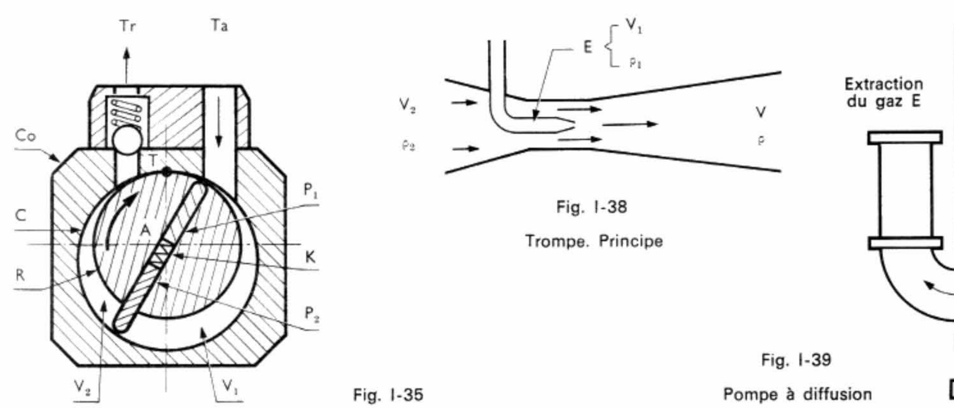


Fig. I-35

Fig. I-38
Trompe. Principe

2° *Pompe Roots* (fig. I-36) : c'est une pompe à engrenages dont les deux rotors R tournent en sens inverse, engrènent l'un dans l'autre et *raclent* les parois internes du corps de pompe C *sans jeux ni frottements*. Les débits sont importants et permettent d'obtenir un vide de 10^{-7} bar.

Fig. I-36

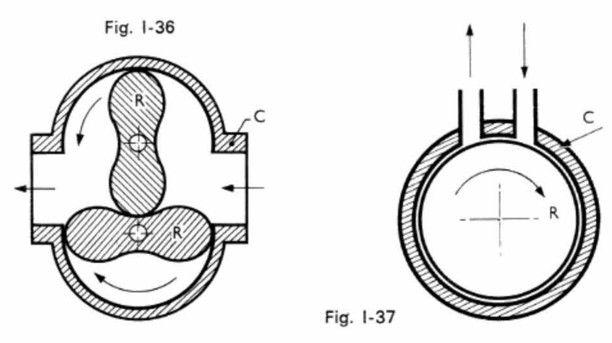


Fig. I-37

3° *Pompe moléculaire* (fig. I-37) : son rotor cylindrique R tourne à très grande vitesse dans la cavité cylindrique du corps de pompe C ; les axes de ces cylindres sont confondus et les jeux réduits. Le rotor, peut être sillonné de gorges en forme de spirales convergeant vers l'orifice de refoulement. Un vide de 10^{-9} bar peut être obtenu.

4° *Trompes* (fig. I-38) : ce sont des pompes statiques comportant un éjecteur E qui débite à très grande vitesse V_1 un fluide de masse volumique ρ_1 importante par rapport à celle ρ_2 du gaz à extraire ; celui-ci est entraîné par viscosité. Il existe des trompes à eau, à vapeurs d'eau, à huile ou à mercure : le vide obtenu peut atteindre 10^{-3} bar.

Extraction du gaz E

Fig. I-39
Pompe à diffusion

5° *Pompe à diffusion* (fig. I-39) : elle utilise également l'effet cinétique de la vapeur, mais la technologie des éjecteurs assure ici un mélange intime (diffusion) du fluide moteur M et du gaz à extraire E ; de plus, un dispositif de refroidissement R assure la condensation du fluide moteur, augmente la masse volumique du gaz E et facilite ainsi son évacuation.

6.2. Moyennes pressions. — Le taux de compression, rapport de la pression de refoulement à la pression d'aspi-

ration, caractérise les ventilateurs et compresseurs utilisés pour obtenir ces moyennes pressions importantes.

1° *Ventilateurs :* axiaux, hélicoïdes ou centrifuges, ils permettent d'obtenir des débits importants mais avec un taux de compression faible, très légèrement supérieur à un.

2° *Compresseurs axiaux :* utilisés sur les turboréacteurs et constitués d'un grand nombre d'ailettes tournant très vite, ils peuvent engendrer des taux de compression voisins de 1,5 ; avec un nombre important d'étages, le taux de compression total peut dépasser 20.

3° *Compresseurs à piston :* leur taux de compression est inférieur à 10. Ils comportent un piston alternatif qui se déplace dans un cylindre muni d'une soupape d'admission et d'une soupape d'échappement.

6.3. Très hautes pressions. — Il est actuellement possible d'atteindre 10^{-4} bar, soit la valeur des contraintes admissibles en traction avec des aciers spéciaux, à condition de travailler sur de très petits volumes et d'adopter des techniques de mise en place des joints tels que ceux-ci se déforment très peu et dans le sens de l'autofrettage.

1° *Compresseur de Cailletet* (fig. I-40) : il permet d'atteindre des pressions de 100 bars. C'est une pompe *P*, aspirante et refoulante, qui envoie de l'eau au-dessus du mercure contenu dans un récipient *M* : le gaz contenu dans un capillaire *C* est comprimé par la colonne de mercure.

2° *Compresseur de Bridgmann* (fig. I-41) : dans cet appareil, le gaz comprimé à 100 bars, est d'abord introduit dans un récipient *R* ; ce récipient, muni d'une soupape *S*, est placé dans l'appareil de Bridgmann où le petit piston *P* comprime un liquide (pétrole) : à l'ouverture de la soupape *S*, le gaz contenu dans *R* se comprime à nouveau. Les pressions atteintes peuvent dépasser 1000 bars.

3° *Ondes de choc :* leur propagation dans des matériaux a fait apparaître localement des pressions de 10^6 bars, soit 10^4 daN/mm² !

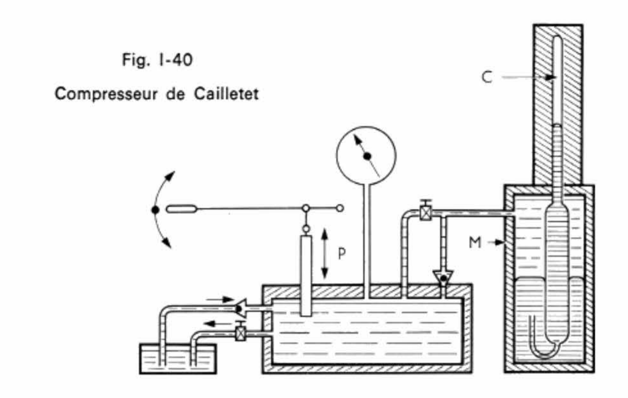


Fig. I-40
Compresseur de Cailletet

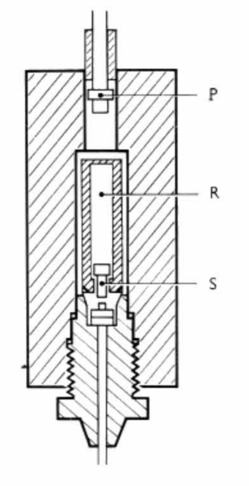


Fig. I-41
Compresseur de Bridgmann

CHAPITRE II

CINÉMATIQUE DES FLUIDES

1. GÉNÉRALITÉS

La cinématique des fluides est la science qui permet l'étude du mouvement des particules de fluide sans faire intervenir les forces qui entrent en jeu.

1.1. Variables de Lagrange - Variables d'Euler (fig. II-1). — Les coordonnées *x, y, z* de la position *P* qu'occupe une particule à l'instant *t*, définies dans un repère orthonormé, sont appelées *variables de Lagrange*. Elles sont chacune des fonctions du temps, dont la connaissance permet de préciser le mouvement.

Il est parfois préférable de définir celui-ci par les composantes de la vitesse $\vec{V}$ de la particule qui passe en un point *P* donné à l'instant *t*. Les composantes de $\vec{V}$: *u, v, w* sont les *variables d'Euler*.

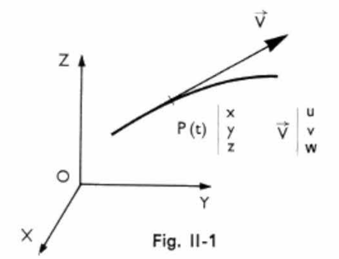


Fig. II-1

Fig. II-2

1.2. Ligne de courant et trajectoire (fig. II-2). — L'ensemble des positions successives occupées par la particule au cours du temps s'appelle *trajectoire* ; celle-ci permet d'avoir une image des différentes directions de vitesse de la particule.

La ligne de courant est une courbe tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse ; elle est définie par les équations suivantes :

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w}$$

1.3. Écoulements permanents. — Lorsque les composantes de la vitesse ne dépendent pas du temps, l'écoulement est dit *permanent :* dans ce cas, les lignes de courant et les trajectoires sont confondues.

L'écoulement est dit *permanent en moyenne* si, durant des intervalles de temps Δt, les grandeurs définies ci-dessus subissent des fluctuations autour d'une valeur moyenne constante (fig. II-3). La vitesse instantanée $V(t)$ est alors égale à la valeur moyenne de la vitesse $\overline{V}$ augmentée de la valeur algébrique de la fluctuation $v(t)$, soit :

Fig. II-3

$V(t) = \overline{V} + v(t)$. La valeur moyenne est :

$$\overline{V} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t} V(t)\,.\,dt$$

2. PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE LA MASSE

Ce principe est traduit mathématiquement par l'équation de continuité.

2.1. Équation de continuité. — Reprenons la figure I-3 en considérant maintenant que le fluide est en mouvement, et écrivons que la masse de fluide qui sort dans le temps dt du volume élémentaire $ABCDEFGH$, diminuée de la masse de fluide qui entre, est égale à la variation de la masse totale. La masse de fluide qui entre par la face $EFGH$ est : $\rho\, u\, dy\, dz\, dt$; la masse de fluide qui sort par $ABCD$ est : $\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx\right] dy\, dz\, dt$; pour l'ensemble des six faces : masse de fluide qui sort — masse qui rentre $= \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right] dx\, dy\, dz\, dt$. Or, la variation de la masse totale est $dm = -\frac{\partial \rho}{\partial t} dt\, dx\, dy\, dz$. Égalant les deux expressions il vient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

ce qui peut s'écrire encore, puisque ρu, ρv, ρw sont les composantes du vecteur $\rho\vec{V}$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\,(\rho\vec{V}) = 0$$

2.2. Cas particuliers. — L'équation de continuité se simplifie dans les cas suivants :

1° *Mouvement permanent :* $\left(\frac{d\rho}{dt} = 0\right)$:

$$\text{div}\,(\rho\,\vec{V}) = 0$$

2° *Fluide incompressible* (ρ constant en tout point) :

$$\text{div}\,\vec{V} = 0$$

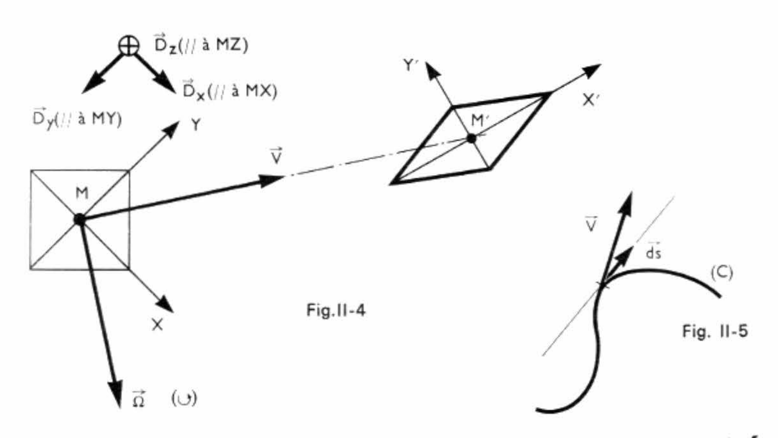


Fig. II-4

3. ÉTUDE DU MOUVEMENT DANS LE CAS GÉNÉRAL

Helmholtz a montré que le mouvement élémentaire d'une particule fluide qui passe du point M au point M' voisin peut se ramener, dans le cas le plus général, à la somme des trois mouvements simples suivants (fig. II-4) :

— Translation en bloc de vitesse $\vec{V}$;

— Rotation en bloc de vitesse angulaire $\vec{\Omega}$ $\left(\vec{\Omega} = \frac{1}{2}\,\overset{\smile}{\text{rot}}\,\vec{V}\right)$;

$\vec{\Omega}$ est le vecteur *tourbillon* ;

— Déformations orthogonales de la particule, de vitesse résultante $\vec{D}$ (donnant une déformation linéaire et une déformation angulaire).

La vitesse $\vec{V'}$ du mouvement résultant a pour expression vectorielle :

$$\vec{V'} = \vec{V} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{MM'} + \vec{D} = \vec{V} + \frac{1}{2}\,\overset{\smile}{\text{rot}}\,\vec{V} \wedge \overrightarrow{MM'} + \vec{D}$$

4. ÉCOULEMENTS SIMPLES

4.1. Circulation d'un vecteur (fig. II-5). — La circulation d'un vecteur $\vec{V}$ le long d'une courbe quelconque (C) est représentée par l'intégrale Γ, calculée le long de (C), du produit scalaire des deux vecteurs $\vec{V}$ (u, v, w) et $\vec{ds}$ (dx, dy, dz), ce dernier étant orienté dans le sens de parcours de (C) :

$$\Gamma = \int_{(C)} \vec{V}.\vec{ds} = \int_{(C)} (u\,dx + v\,dy + w\,dz)$$

4.2. Écoulement à potentiel des vitesses. — Si le vecteur tourbillon est nul en tout point, alors $\overset{\smile}{\text{rot}}\,\vec{V} = \vec{0}$, et il existe une fonction $\varphi(x, y, z)$ telle que : $\vec{V} = \overrightarrow{\text{grad}}\,\varphi$. L'écoulement est dit *irrotationnel*, ou *à potentiel des vitesses*. Les composantes du vecteur $\vec{V}$ sont alors :

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \qquad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

La circulation du vecteur $\vec{V}$ entre deux points A et B a pour expression :

$$\int_{(AB)} \vec{V}.\vec{ds} = \int_{(AB)} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} dx + \frac{\partial \varphi}{\partial y} dy + \frac{\partial \varphi}{\partial z} dz\right) = \varphi_B - \varphi_A$$

Elle ne dépend que des coordonnées de A et de B et non de la courbe C, d'extrémités A et B, le long de laquelle on calcule la circulation. L'équation de continuité, dans le cas du fluide incompressible, prend la forme :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

que l'on écrit encore : $\Delta\varphi = 0$.

Cette équation différentielle, dite équation de Laplace, admet pour solution des *fonctions harmoniques*.

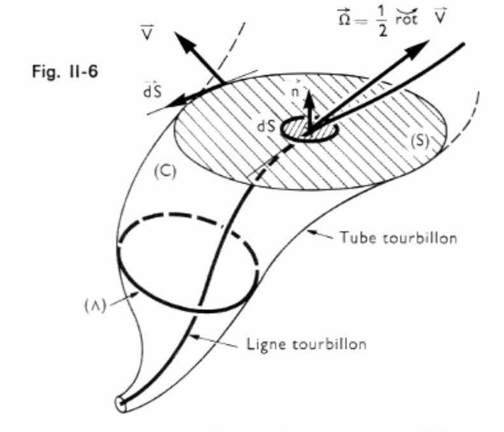


Fig. II-5

Fig. II-6

4.3. Écoulement rotationnel. — Si le vecteur tourbillon n'est pas nul, l'écoulement est dit *rotationnel*. Donnons quelques définitions :

— Une *ligne tourbillon* est une ligne tangente en chaque point au vecteur tourbillon en ce point.

— L'*intensité* d'un tube tourbillon, constitué de l'ensemble des lignes tourbillon *incluses* dans une courbe fermée (Λ) (fig. II-6), est égale au flux du rotationnel du vecteur vitesse à travers une section (S) quelconque de ce tube :

$$I = \int_{(S)} \overset{\smile}{\text{rot}}\,\vec{V}.\vec{n}\,dS = 2\int_{(S)} \vec{\Omega}.\vec{n}\,dS$$

Cette intensité est aussi égale à la circulation du vecteur vitesse le long du contour fermé (C) de (S), c'est-à-dire sur la paroi du tube tourbillon :

$$I = \Gamma = \int_{(C)} \vec{V}.\vec{ds}$$

— Le *vortex* est un tube tourbillon d'intensité finie.

4.4. Étude de quelques écoulements plans. — Supposons $\Omega = 0$ en tout point. Alors $\vec{V}$ est toujours parallèle au plan xoy et l'étude peut être faite dans ce plan. Considérons l'écoulement permanent irrotationnel d'un fluide incompressible.

1° *Notion de fonction de courant :* la fonction de courant ψ est reliée, par définition, aux composantes du vecteur vitesse $\vec{V}$ par les relations :

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

On démontre alors que la fonction de courant ψ possède une valeur constante le long d'une ligne de courant et que, comme la fonction potentielle, c'est une fonction harmonique. Les réseaux constitués d'équipotentielles et de lignes de courant sont orthogonaux (fig. II-7). Le débit volumique

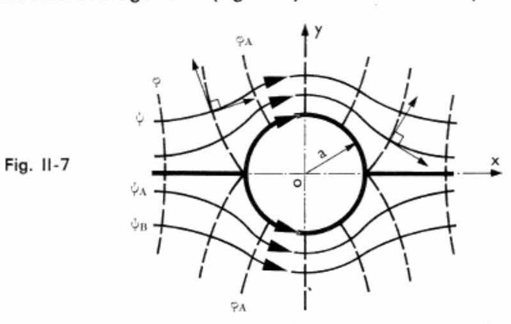


Fig. II-7

entre deux lignes de courant ψ_A et ψ_B est constant et, le long d'une ligne de courant, la vitesse est inversement proportionnelle à l'écartement des équipotentielles.

2° *Notion de fonction analytique : z* étant une variable complexe ($z = x + iy$), toute fonction $f(z)$ qui admet, dans un domaine donné, une dérivée en chaque point est dite *analytique*.

On peut alors poser : $f(z) = \varphi(x,y) + i\,\psi(xy)$

avec : $\dfrac{\partial \varphi}{\partial x} = \dfrac{\partial \psi}{\partial y}$ et $\dfrac{\partial \varphi}{\partial y} = -\dfrac{\partial \psi}{\partial x}$,

les fonctions φ et ψ étant harmoniques. On montre par ailleurs que la dérivée $\dfrac{df}{dz}$ a pour expression :

$$\frac{df}{dz} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + i\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} - i\frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

Il en résulte que les composantes u et v du vecteur vitesse $\vec{V}$ sont reliées à la dérivée de la fonction $f(z)$ par la relation :

$$u - iv = \frac{df}{dz}$$

3° *Quelques cas d'écoulements plans :* la fonction $f(z)$ étant donnée, le type de l'écoulement est connu par la

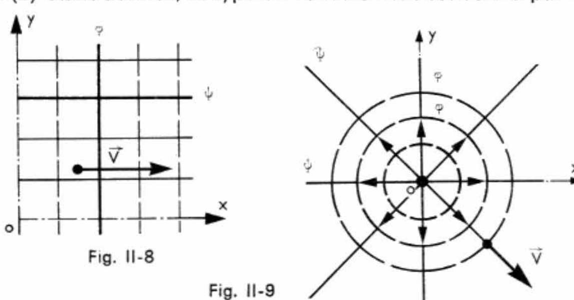


Fig. II-8

Fig. II-9

détermination des composantes de la vitesse et des fonctions φ et ψ.

— Pour : $f(z) = V.z = V.(x + iy)$, avec : $V =$ Cte (fig. II-8), les fonctions φ et ψ sont : $\varphi = V.x$, et : $\psi = V.y$; elles correspondent aux champs des vitesses et des pressions d'un *écoulement uniforme* de vitesse $\vec{V}$ parallèle à ox.

— Pour : $f(z) = C \log_e z = C \log_e r.e^{i\theta} = C(\log_e r + i\theta)$ (fig. II-9) les fonctions φ et ψ sont :

$$\varphi = C \log_e r = C \log_e \sqrt{x^2 + y^2}, \text{ et} : \psi = C\,\theta = C \operatorname{arctg} \frac{y}{x}.$$

Elles caractérisent l'écoulement au voisinage d'une *source* ($C > 0$) ou d'un *puits* ($C < 0$) : les équipotentielles sont des cercles concentriques et les lignes de courant sont des demi-droites partant de l'origine.

— Pour : $f(z) = a.z^2 = a(x + iy)^2$ (fig. II-10), les fonctions φ et ψ deviennent : $\varphi = a(x^2 - y^2)$, et : $\psi = 2\,a\,x\,y$ et les composantes de la vitesse : $u = 2\,ax$, et : $v = -2\,ay$. Les lignes de courant sont des hyperboles équilatères et les équipotentielles constituent un réseau d'hyperboles orthogonales aux précédentes, ce qui correspond à un *écoulement perpendiculaire* (pour y tendant vers l'infini) *à un obstacle rectiligne* (axe $x'x$).

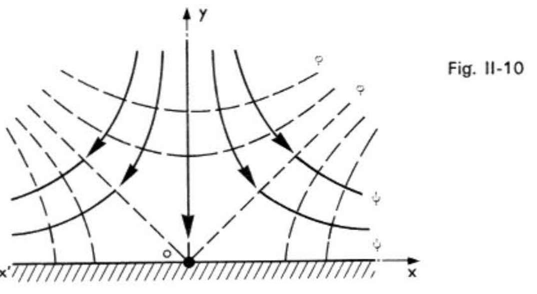


Fig. II-10

— Pour : $f(z) = V_0\left(z + \dfrac{a^2}{z}\right)$, avec : $V_0 =$ Cte (V. fig. II-7), les fonctions φ et ψ sont : $\varphi = V_0\,x\left(1 + \dfrac{a^2}{x^2 + y^2}\right)$ et : $\psi = V_0\,y\left(1 - \dfrac{a^2}{x^2 + y^2}\right)$, et la ligne de courant : $\psi = 0$, est constituée par l'axe $x'x$ et par un cercle de centre o et de rayon a. C'est le cas d'un *écoulement autour d'un cercle de rayon a*, de vitesse $\vec{V_0}$, à l'infini, parallèle à ox.

— Pour : $f(z) = i\,C \log_e z = iC(\log_e r + i\theta)$, les fonctions φ et ψ sont : $\varphi = -C\,\theta$, et : $\psi = C \log_e r$: les équipotentielles sont des demi-droites passant par l'origine et les lignes de courant sont des cercles concentriques. La vitesse conserve un module constant pour chacun de ces cercles. Sa mesure algébrique sur le cercle de rayon r orienté positivement dans le plan a pour valeur : $V = -\dfrac{C}{r}$. La circulation Γ du vecteur $\vec{V}$ est la même pour toutes les lignes de courant. En effet :

$$\Gamma = \int \vec{V}.\vec{ds} = \int_0^{2\pi} -\frac{C}{r}\,rd\theta = -2\pi\,C$$

C'est un écoulement giratoire, appelé *tourbillon ponctuel* (fig. II-11). En o, φ et V sont indéterminés. $\Gamma = 0$ pour toute courbe fermée *n'entourant pas l'origine.*

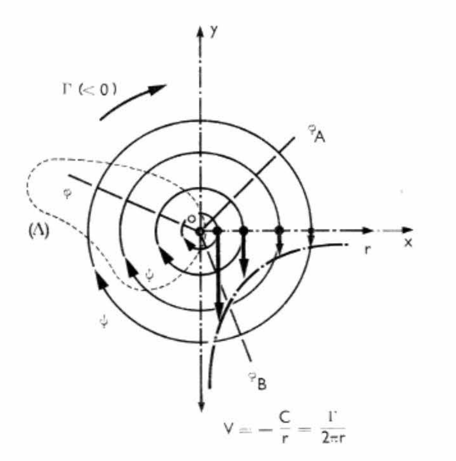


Fig. II-11

4.5. Superposition d'écoulements plans. — L'équation de Laplace est de forme linéaire : si les fonctions $f_1(z)$ et $f_2(z)$ sont solutions, toute combinaison linéaire de ces fonctions est aussi solution et, en particulier, leur somme : potentiels et cotes des lignes de courant s'ajoutent alors,

ainsi que les vecteurs vitesse. Les applications suivantes sont courantes :

1° *Superposition d'un puits et d'une source,* de même débit mais situés à une distance $2a$ l'un de l'autre : $f(z) = C\,[\log_e(z - a) - \log_e(z + a)]$ (fig. II-12).

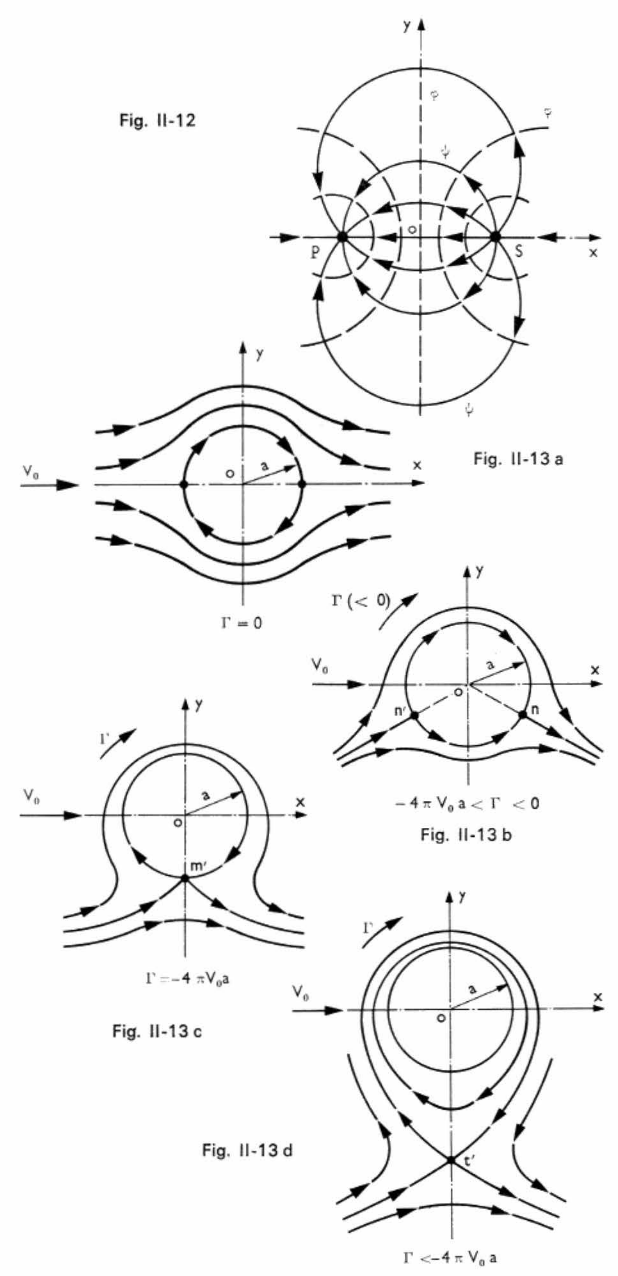


Fig. II-12

Fig. II-13 a

Fig. II-13 b

Fig. II-13 c

Fig. II-13 d

2° *Superposition de l'écoulement autour d'un cercle de rayon a, de vitesse V_0 à l'infini, et d'un tourbillon ponctuel concentrique, de vitesse $\dfrac{\Gamma}{2\pi}$ sur le cercle* (fig. II-13 a) : son importance est considérable en aérodynamique.

La fonction analytique :

$$f(z) = V_0\left(z + \frac{a^2}{z}\right) - i\,\frac{\Gamma}{2\pi}\log_e\frac{z}{a}$$

la fonction potentielle :

$$\varphi = \frac{\Gamma}{2\pi}\,\theta + V_0\left(r + \frac{a^2}{r}\right)\cos\theta$$

et la fonction de courant :

$$\psi = -\frac{\Gamma}{2\pi}\log_e\frac{r}{a} + V_0\left(r - \frac{a^2}{r}\right)\sin\theta$$

permettent de déterminer, en particulier, la vitesse sur le cercle :

$$V(\theta)_{(r=a)} = \left(\frac{1}{r}\frac{d\varphi}{d\theta}\right)_{(r=a)} = \frac{\Gamma}{2\pi a} - 2\,V_0\sin\theta$$

La forme de cette équation montre que :

— Pour : $-4\pi V_0 a < \Gamma < +4\pi V_0 a$, il existe deux points de vitesse nulle n et n' (fig. II-13 b).

— Pour : $\Gamma = -4\pi V_0 a$, ces deux points sont confondus en m' sur ov (fig. II-13 c).

— Pour : $\Gamma < -4\pi V_0 a$, les deux points sont imaginaires et il existe alors un point de vitesse nulle dans l'écoulement t' (fig. II-13 d).

Les figures correspondant à $\Gamma > 0$ $(C < 0)$ sont les symétriques par rapport à ox des figures II-13 b, c et d.

5. LES TRANSFORMATIONS CONFORMES

5.1. Propriétés des transformations conformes. — La transformation qui fait correspondre à toute figure du plan (xoy) une figure du plan (XOY) est dite *conforme* si elle conserve les angles orientés. Le plan (xoy) étant le domaine de définition de la variable complexe z et le plan (XOY) celui de la fonction Z, on montre que la transformation $Z = F(z)$ est conforme si Z est une fonction analytique de z.

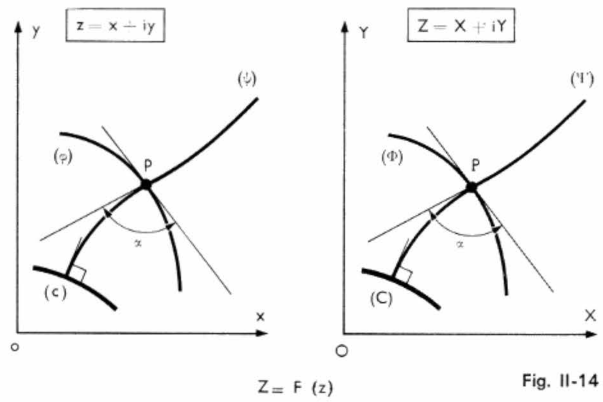


Fig. II-14

Dans ces conditions, on sait déterminer l'écoulement autour d'un contour (C) du plan (XOY) quand on connaît l'écoulement autour du contour (c) du plan (xoy) et la transformation conforme qui fait correspondre (C) à (c). En particulier : la circulation des vitesses le long d'une courbe quelconque du plan (xoy) est égale à la circulation le long de sa transformée dans le plan (XOY) ; chaque équipotentielle transformée conserve le potentiel de l'équipotentielle initiale et deux lignes de courant correspondantes ont la même cote.

5.2. Transformation de Joukovski (fig. II-15 a et b). L'écoulement autour du cercle de rayon a avec tourbillon concentrique (V. § 4.5, 2°) étant connu, on a recherché une transformation conforme $Z = F(z)$ faisant correspondre au cercle un profil d'aile d'avion, afin de déterminer la répartition des vitesses autour de ce profil, dans les conditions d'écoulement plan d'un fluide incompressible.

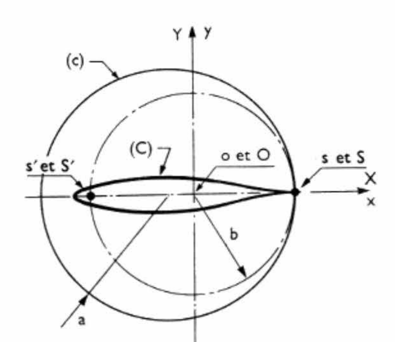


Fig. II-15 a

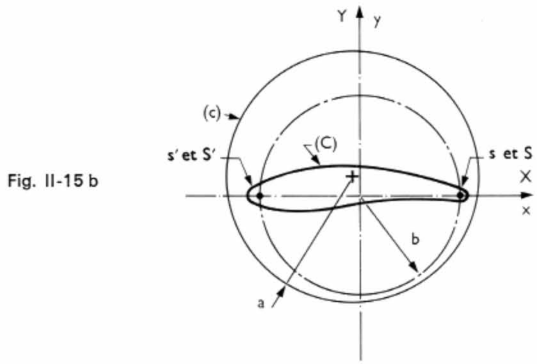


Fig. II-15 b

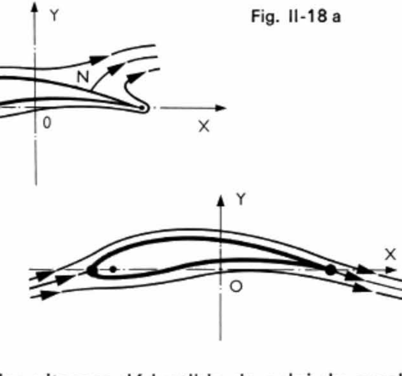


Fig. II-18 a

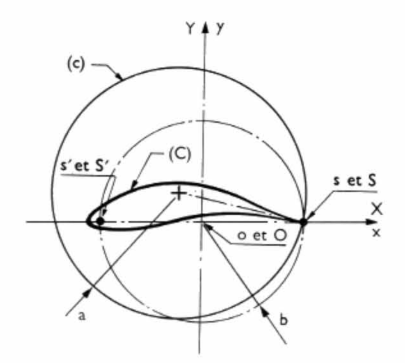


Fig. II-16

Joukovski a montré que la transformation conforme: $Z = \frac{1}{2}\left(z + \frac{b^2}{z}\right)$, avec b réel, répondait au problème si ses deux points singuliers S et S' (où: $Z = \pm b$ et $\frac{dZ}{dz} = 0$), transformés de s et s' (où: $z = \pm b$) sont à la fois à l'intérieur du profil (C) de l'aile et à l'intérieur du cercle (c) correspondant. Cette condition impose de choisir $b \leqslant a$ (fig. II-16). La région entourant le profil correspond alors à l'extérieur du cercle et la vitesse en tout point de l'écoulement autour du profil peut être déterminée à partir de l'écoulement connu autour du cercle, les points singuliers, ainsi que les points correspondant à z tendant vers zéro ($Z \to \infty$, et: $\frac{dZ}{dz} \to \infty$), n'ayant pas d'*existence physique*.

Quand le cercle passe par s (ou s'), point singulier où l'angle n'est plus conservé, le profil passe par S (ou S') et à l'angle π pour le cercle correspond un angle 2π pour le profil: celui-ci finit en pointe par un point de rebroussement appelé bord de fuite (fig. II-17). Dans ce cas, si la

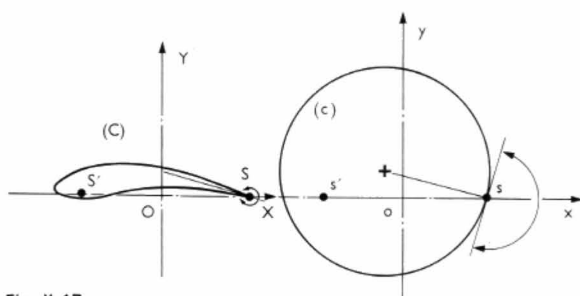


Fig. II-17

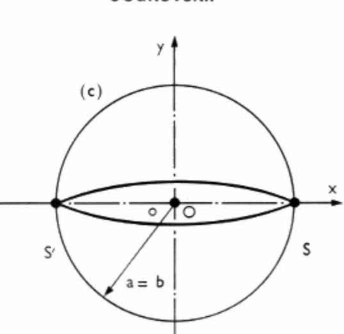
circulation autour du cercle est quelconque, la position de N, point de vitesse nulle sur le profil (transformé de n: fig. II-18 a), est aussi quelconque et l'écoulement autour du profil contourne cette pointe avec des vitesses locales tendant vers l'infini, condition qui ne peut pas exister dans l'écoulement réel: Joukovski a montré qu'il fallait amener l'un des points de vitesse nulle sur le cercle au point s (en choisissant convenablement la valeur de la circulation) pour que le point correspondant de vitesse nulle sur le profil soit au bord de fuite et qu'il existe autour du profil un écoulement réel à potentiel des vitesses déductible de celui du cercle avec tourbillon (fig. II-18 b).

Fig. II-18 b

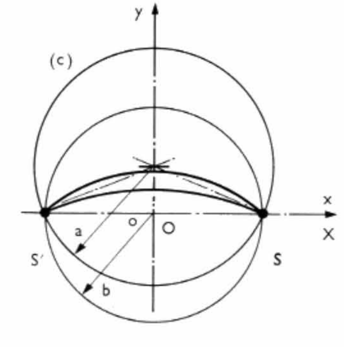
5.3. Transformation de Karmann-Trefftz. — Les profils Joukovski, à angle de bord de fuite nul, étaient très fragiles. Trefftz et Karmann ont généralisé la transformation de Joukovski en proposant la transformation:

$$\frac{Z - b}{Z + b} = \left(\frac{z - b}{z + b}\right)^p$$

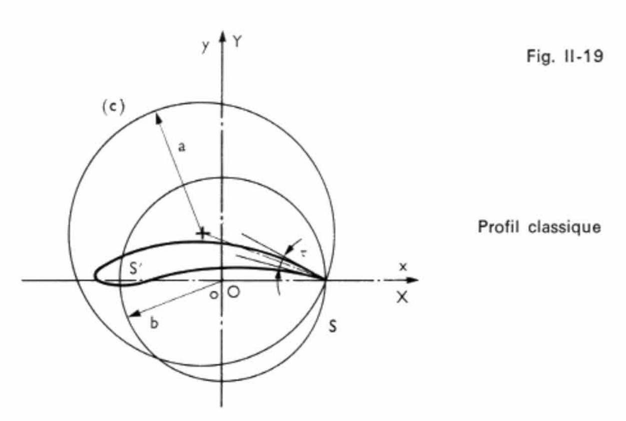
b et p étant réels et positifs; cette transformation donne un angle de bord de fuite τ non nul: $\tau = (2 - p)\,\pi$. Suivant les valeurs de a, de b et de p, et suivant la position du centre du cercle (c), on obtient, par exemple, un profil lenticulaire, un profil en quartier de lune ou un profil classique (fig. II-19). Pour $p = 2$, on retrouve la transformation de Joukovski.



Profil lenticulaire



Profil en quartier de lune



Profil classique

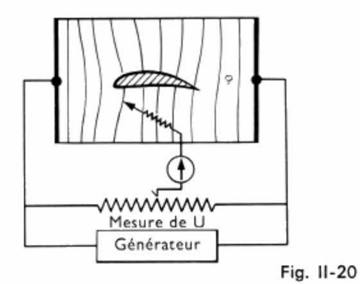
Fig. II-19

5.4. Autres transformations conformes. — Celle de R. von Mises est obtenue à partir d'un développement limité:

$$Z = z + \frac{a_1}{z} + \frac{a_2}{z^2} + \ldots + \frac{a_n}{z^n}$$

Les transformations conformes dites *inverses* ont servi pour faire l'étude théorique a posteriori de profils réalisés empiriquement.

5.5. Emploi des calculateurs analogiques. — Les solutions de l'équation de Laplace s'obtiennent mathématiquement de façon simple lorsque les conditions aux limites sont analytiquement faciles à traduire. Dans de nombreux cas pratiques les problèmes deviennent complexes et la résolution peut être obtenue plus rapidement par voie analogique : pour ce faire, il faut que les équations du champ aérodynamique et celles du champ physique choisi soient analogues. Les analogies électriques sont les plus utilisées : cuve électrique Peres-Malavard (fig. II-20) et réseaux maillés.



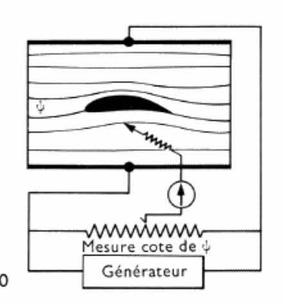


Fig. II-20

CHAPITRE III

DYNAMIQUE DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES NON VISQUEUX

1. GÉNÉRALITÉS

La dynamique des fluides permet d'étudier les relations qui existent entre le mouvement des particules et les forces qui s'exercent sur elles. Dans une première étude, le fluide est considéré comme non visqueux, sans dissipation d'énergie, thermiquement et calorifiquement parfait et en mouvement permanent.

Les principes généraux de la mécanique et de la thermodynamique s'appliquent à la masse de fluide considérée (conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement et conservation de l'énergie) et résoudre un problème de dynamique des fluides, c'est trouver les six inconnues caractérisant le mouvement du fluide et son état (u, v, w, p, ρ, T). Aux trois équations d'Euler (voir ci-après), il y a lieu d'ajouter les trois équations de continuité, d'état et de transformation thermodynamique. Les conditions aux limites sont définies par des parois, fixes ou mobiles, ou par des surfaces isobares ; avec les conditions initiales elles permettent de trouver en général la solution unique du système de six équations à six inconnues.

Dans ce chapitre seront seuls considérés les fluides parfaits incompressibles, c'est-à-dire dont la masse volumique ρ ne dépend que de la pression et de la température ; l'effet de la vitesse sur ρ étant négligeable.

2. ÉQUATIONS DE LA DYNAMIQUE

2.1. Équations d'Euler. — Aux forces de volume $\vec{F}$ (X, Y, Z) et de pression $(-\frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p)$ s'exerçant sur l'unité de masse (V. chap. 1, § 2.1) il y a lieu d'adjoindre maintenant la force d'inertie $-m\vec{\gamma}$ (avec $m = 1$), $\vec{\gamma}$ étant l'accélération. Écrivons que la somme de ces forces est nulle (*équilibre dynamique*) :

$$\vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p - \vec{\gamma} = \vec{0}$$

C'est l'*équation d'Euler*, que l'on peut écrire :

$$\vec{\gamma} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p$$

ou encore :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p$$

Déterminons les trois composantes du vecteur $\vec{\gamma}$: γ_x, γ_y, γ_z. Entre les instants t et $t + dt$, la composante u du vecteur vitesse passe de la valeur $u\,(x, y, z, t)$ à la valeur $u\,(x + dx,\ y + dy,\ z + dz,\ t + dt)$ avec : $dx = udt$, $dy = vdt$, $dz = wdt$. Or :

$$u\,(x + dx, y + dy, z + dz, t + dt) = u\,(x, y, z, t)$$

$$+ dx\frac{\partial u}{\partial x} + dy\frac{\partial u}{\partial y} + dz\frac{\partial u}{\partial z} + dt\frac{\partial u}{\partial t}$$

La composante γ_x de l'accélération a donc pour valeur, d'après la définition même de l'accélération :

$$\gamma_x = \frac{u\,(x + dx, y + dy, z + dz, t + dt) - u\,(x, y, z, t)}{dt}$$

soit :

$$\gamma_x = \frac{dx}{dt}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{dy}{dt}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{dz}{dt}\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t}$$

ou encore :

$$\gamma_x = u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t}$$

Les composantes γ_y et γ_z peuvent être calculées de la même façon.

L'équation vectorielle d'Euler donne donc, par projection sur les trois axes :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} = X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} = Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} = Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$$

Ces trois équations sont également appelées *équations d'Euler*.

Dans le cas du mouvement permanent, le vecteur vitesse est, en chaque point, indépendant du temps. Alors :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0$$

et les équations d'Euler s'écrivent :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$$

2.2. Équation de Bernoulli. — Considérons le cas du mouvement permanent et supposons que les forces de volume dérivent d'un potentiel U tel que $\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,U$. Alors $X = -\frac{\partial U}{\partial x}$, $Y = -\frac{\partial U}{\partial y}$, $Z = -\frac{\partial U}{\partial z}$, et la première équation d'Euler du dernier groupe d'équations écrit devient :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$$

Prenons pour axe $x'x$, à l'instant t, la tangente au point considéré. Les coordonnées de $\vec{V}$ sont alors $u = V$, $v = 0$, $w = 0$ et de plus $dx = ds$ (ds : élément d'arc). La relation précédente peut alors s'écrire :

$$V\frac{dV}{ds} = -\frac{dU}{ds} - \frac{1}{\rho}\frac{dp}{ds}$$

ou encore : $$V \frac{dV}{ds} + \frac{dU}{ds} + \frac{1}{\rho}\frac{dp}{ds} = 0$$

$$\frac{1}{2} V^2 + U + \int \frac{dp}{\rho} = \text{Cte}$$

Dans le cas où ρ est constant (*fluides incompressibles*) et où les forces de volume sont réduites aux forces de pesanteur ($U = gz$), on obtient l'*équation de Bernoulli :*

$$\frac{V^2}{2} + g\,z + \frac{p}{\rho} = \text{Cte} \qquad (1)$$

Elle est aussi présentée sous les formes suivantes :

$$\rho \frac{V^2}{2} + \rho g\,z + p = \text{Cte} \qquad (2)$$

$$\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{Cte} \qquad (3)$$

Ainsi, dans le cas de la figure III-1, nous pouvons écrire :

$$\frac{V_1^2}{2} + gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

La somme $X = p + \rho g\,z + \rho \frac{V^2}{2}$ (équation 2) s'appelle *charge* de l'écoulement.

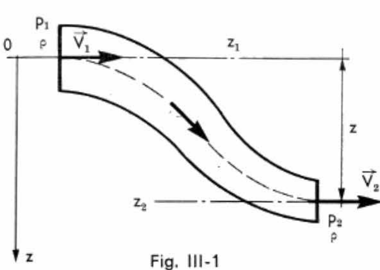


Fig. III-1

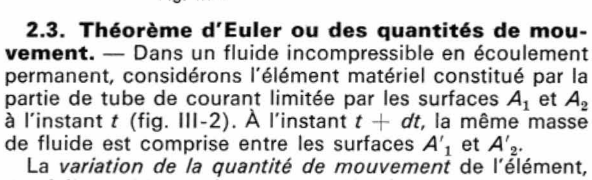


Fig. III-2

2.3. Théorème d'Euler ou des quantités de mouvement. — Dans un fluide incompressible en écoulement permanent, considérons l'élément matériel constitué par la partie de tube de courant limitée par les surfaces A_1 et A_2 à l'instant t (fig. III-2). À l'instant $t + dt$, la même masse de fluide est comprise entre les surfaces A'_1 et A'_2.

La *variation de la quantité de mouvement* de l'élément, due à l'apparition de la masse $A_2\,A'_2$ à la place de la masse $A_1\,A'_1$, a pour valeur :

$$q_m\,\vec{V_2}\,dt - q_m\,\vec{V_1}\,dt$$

En désignant par $\Sigma \vec{F}$ la somme des forces extérieures appliquées sur l'élément (forces de volume et forces de pression exercées sur toute la surface de l'élément par les parois ou par le fluide extérieur), le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$\frac{d}{dt}\,[q_m\,(\vec{V_2} - \vec{V_1})\,dt] = \Sigma \vec{F}$$

soit : $$q_m\,(\vec{V_2} - \vec{V_1}) = \Sigma \vec{F}$$

relation traduisant le *théorème d'Euler*.

3. INTERPRÉTATION DE L'ÉQUATION DE BERNOULLI

3.1. Interprétation énergétique. — Pour une masse de fluide donnée, l'équation (1) s'écrit :

$$\frac{1}{2} mV^2 + mg\,z + \frac{mp}{\rho} = \text{Cte}$$

Les trois termes $\frac{1}{2} mV^2$, $mg\,z$, $\frac{mp}{\rho}$ représentent respectivement l'*énergie cinétique, l'énergie potentielle* dite « *de situation* », l'*énergie potentielle* dite « *de pression* ». L'équation de Bernoulli exprime donc que l'énergie mécanique totale du fluide reste constante.

3.2. Interprétation en pression. — Sous la forme (2), l'équation de Bernoulli exprime que la somme de trois termes, qui sont tous trois homogènes à une pression, se conserve. p est la *pression statique*, pression à l'intérieur du fluide telle qu'elle est définie en statique ; $\frac{\rho V^2}{2}$ est la *pression cinétique* (ou *dynamique*) ; la somme $p_p = \frac{\rho V^2}{2} + p$ est appelée *pression d'arrêt*.

3.3. Équation de Laplace. — Dans le cas d'un fluide au *repos*, le théorème de Bernoulli se réduit à : $\rho g\,z + p =$ Cte, et sous forme différenciée :

$$dp = -\rho g\,dz$$

C'est l'équation de Laplace : elle régit l'évolution de la pression en fonction de l'altitude z ; elle a été rencontrée en statique des fluides.

3.4. Formule de Toricelli. — Considérons l'écoulement d'un fluide par un orifice en mince paroi (fig. III-3). Prenons l'origine O de l'axe Oz (dirigé vers le haut) dans la région où la section de la veine liquide devient constante (région très voisine de l'orifice). Les pressions statiques au voisinage de la surface libre ($z = h$) et en O ($z = 0$) sont égales à la pression atmosphérique p_a. La vitesse est pratiquement nulle sur la surface libre. Soit V sa valeur à la sortie de l'orifice. L'équation de Bernoulli donne :

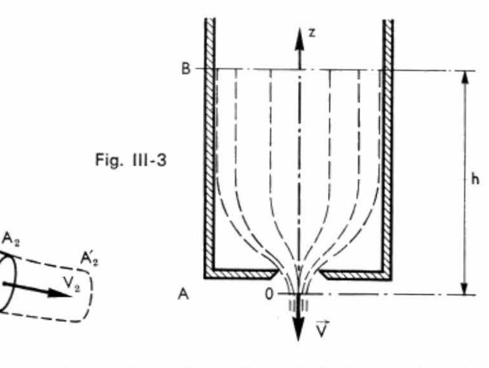


Fig. III-3

$$0 + \rho gh + p_a = \rho \frac{V^2}{2} + 0 + p_a$$

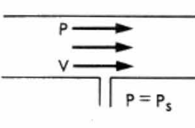
soit : $$\rho gh = \rho \frac{V^2}{2} \quad \text{et} \quad V = \sqrt{2\,gh}$$

C'est la *formule de Toricelli*.

4. APPLICATION DE L'ÉQUATION DE BERNOULLI

4.1. Prises de pression

1° *Pression statique :* la pression statique est celle que subit une particule qui suit strictement le mouvement du *fluide*. Néanmoins, une prise de pression statique peut être réalisée à la paroi d'une canalisation ou sur la paroi d'un corps immergé dans la veine fluide (fig. III-4) si



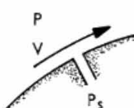


Fig. III-4

la paroi peut être considérée comme une ligne de courant de l'écoulement et que la cavité qui constitue la prise de pression est sans saillies, ni bavures, ni enfoncements. Le corps immergé (équipé de la prise de pression) ne doit pas modifier la vitesse $\vec{V}$; ainsi un disque de Ser exige beaucoup de soins pour sa mise en place, tandis que la sonde Girerd-Guienne, moins sensible à l'orientation. se révèle plus précise et plus fidèle (fig. III-5).

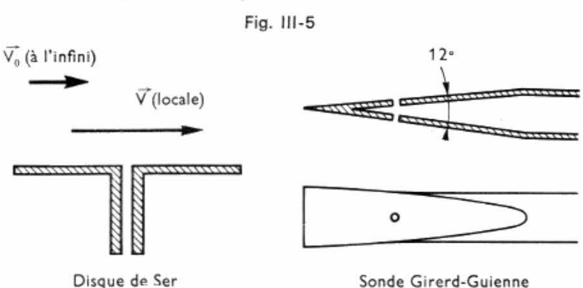
La pression statique locale p en un point où la vitesse locale est $\vec{V}$ comparée à la pression p_0 de l'écoulement à

potentiel des vitesses, de vitesse uniforme $\vec{V}_0$ est caractérisée par un coefficient de pression :

$$K_p = \frac{p - p_0}{\rho \frac{V_0^2}{2}} = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2$$

déduit de l'application du théorème de Bernoulli ; la valeur $K_p = 0$ signifie que la vitesse locale V est égale à la vitesse à l'infini V_0 ; une valeur de K_p négative indique que la vitesse locale est supérieure à V_0.

Fig. III-5



2° *Pression d'arrêt :* la prise de pression d'arrêt s'effectue en plaçant dans le fluide un tube dont le plan de l'orifice est perpendiculaire aux lignes de courant (fig. III-6). En appliquant le théorème de Bernoulli entre un point situé en amont de l'orifice et le centre A de l'orifice (pour lequel $V = 0$) on trouve en effet :

$$\underbrace{\frac{\rho V^2}{2} + p}_{\text{amont}} = \underbrace{0 + p_m}_{\text{orifice}} \quad \text{(pression mesurée)}$$

La somme $\frac{\rho V^2}{2} + p$ représente bien la pression d'arrêt ; en ce point le coefficient de pression K_p est égal à 1.

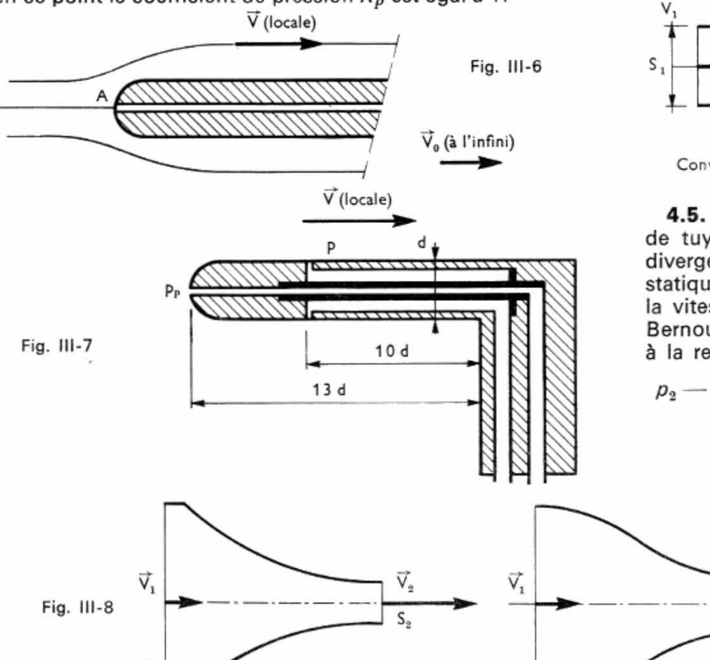


Fig. III-6

Fig. III-7

Fig. III-8

4.2. Tube de Pitot (fig. III-7). — Le tube de Pitot, appelé parfois tube de Pitot double, permet d'envoyer sur un manomètre différentiel la pression d'arrêt, d'une part, et la pression statique, d'autre part ; le manomètre indique donc la pression cinétique et la vitesse est obtenue par la relation :

$$V = \sqrt{\frac{2\,(p_p - p)}{\rho}}$$

4.3. Convergent ou collecteur (fig. III-8). — Un convergent sert à mettre le fluide en mouvement : il transforme l'énergie potentielle de pression en énergie cinétique. Généralement droit pour les gaz (canalisations de ventilation ou soufflerie), il peut être courbe pour les liquides (bâche spirale d'entrée d'une machine hydraulique). Il est facile de dessiner un convergent : le rendement, souvent voisin de l'unité, est excellent.

4.4. Divergent ou diffuseur (fig. III-9). — Le diffuseur permet inversement la transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle : il est utilisé lorsqu'on veut réduire une vitesse sans grande perte d'énergie. Le rendement η du diffuseur est le rapport de l'énergie potentielle récupérée à l'énergie cinétique perdue, rapport qui s'exprime par la relation :

$$\eta = \frac{p_2 - p_1}{\frac{\rho}{2}\left(V_1^2 - V_2^2\right)}$$

p_1 et p_2 étant les pressions statiques respectivement en amont et en aval du diffuseur.

Dans un diffuseur conique, le meilleur rendement est obtenu pour un angle au sommet voisin de 7° : il ne peut dépasser des valeurs de l'ordre de 0,85, du fait des pertes par frottements toujours élevées dans le cas d'un ralentissement de fluide.

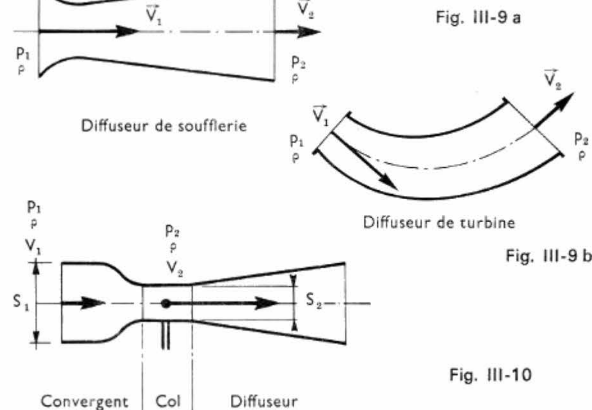


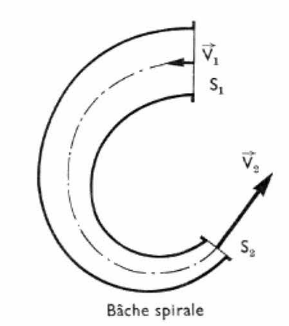
Fig. III-9 a

Fig. III-9 b

Fig. III-10

4.5. Tube de Venturi (fig. III-10). — C'est un élément de tuyauterie comprenant un convergent, un col et un divergent. Si p_1, V_1 et p_2, V_2 sont respectivement la pression statique et la vitesse à l'entrée (section S_1), la pression et la vitesse au niveau du col (section S_2), le théorème de Bernoulli et la règle de conservation des débits conduisent à la relation :

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} - \frac{\rho V_1^2}{2} = \frac{\rho V_1^2}{2}\left[\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - 1\right] = K\,\frac{\rho V_1^2}{2}$$



Bâche spirale

K, coefficient d'amplification ou *coefficient de Venturi*, peut atteindre théoriquement 15 pour un diamètre de col égal à la moitié du diamètre d'entrée. Le coefficient réel est en fait plus faible (3 à 4) du fait des pertes de charge dues à la viscosité du fluide et aux phénomènes de compressibilité. La mesure de $p_2 - p_1$ permet de calculer V_1 et l'élément de Venturi est utilisé pour la détermination des faibles vitesses ou des faibles débits.

5. APPLICATION DU THÉORÈME DES QUANTITÉS DE MOUVEMENT

Il est souvent intéressant de connaître l'action $\vec{R}$ du fluide sur une paroi, et plus généralement sur une surface solide (ou fluide) donnée. On applique alors le théorème d'Euler, et la relation du paragraphe 2.3 donne, en désignant par $\vec{P}$ la résultante des forces de pression et par $\vec{\pi}$ la résultante des forces de volume (*poids* du fluide dans la plupart des cas) :

$$q_m\,(\vec{V_2} - \vec{V_1}) = \vec{P} + \vec{\pi}$$

Comme $\vec{R} = -\vec{P}$, il vient, en définitive :

$$\vec{R} = \vec{\pi} - q_m\,(\vec{V_2} - \vec{V_1})$$

5.1. Réaction d'un jet (fig. III-11). — La réaction d'un jet, qui s'exerce sur le réservoir ou sur la conduite d'où sort le jet (tuyau d'arrosage, lance d'incendie, etc.), tend à déplacer le réservoir ou la conduite en sens inverse du sens de l'écoulement (cette réaction est indépendante du milieu extérieur). Appliquons la relation ci-dessus à l'ensemble du réservoir ou de la conduite, en négligeant les forces de volume, et en faisant $\vec{V_1} = \vec{0}$ et $\vec{V_2} = \vec{V}$:

$$\vec{R} = -q_m\,\vec{V}$$

Comme $q_m = \rho S V$, l'intensité de la réaction est :

$$R = \rho S V^2$$

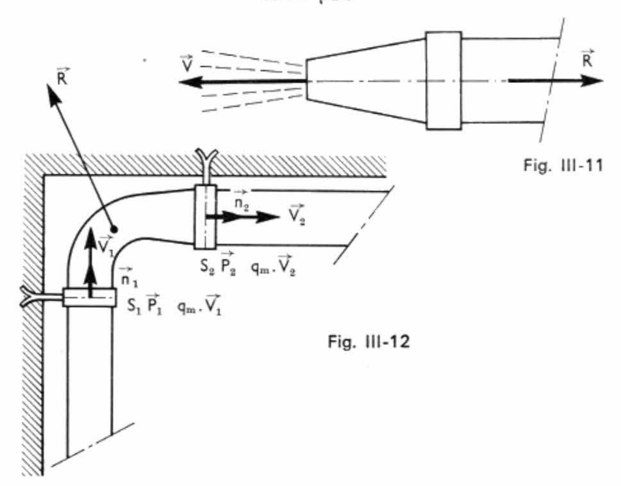


Fig. III-11

Fig. III-12

5.2. Action d'un fluide sur une conduite (fig. III-12). — L'élément de conduite limité par les sections d'aires S_1 et S_2 est soumis de la part du fluide à la force résultante $\vec{R}$. Pour calculer $\vec{R}$, appliquons le théorème d'Euler en observant que la résultante des forces de pression sur la surface du fluide contenu dans l'élément de conduite est soumis à la force de pression $-\vec{R}$ exercée par la conduite et aux forces $p_1\,S_1\,\vec{n_1}$ et $-p_2\,S_2\,\vec{n_2}$ exercées en amont et en aval par le fluide extérieur ($\vec{n_1}$ et $\vec{n_2}$ sont les vecteurs unitaires des normales orientés dans le sens des vitesses). Alors :

$$q_m\,(\vec{V_2} - \vec{V_1}) = -\vec{R} + p_1\,S_1\,\vec{n_1} - p_2\,S_2\,\vec{n_2} + \vec{\pi}$$

d'où :

$$\vec{R} = \vec{\pi} + p_1\,S_1\,\vec{n_1} - p_2\,S_2\,\vec{n_2} + q_m\,\vec{V_1} - q_m\,\vec{V_2}$$

5.3. Poussée d'un réacteur (fig. III-13). — Soit $\vec{V_0}$ la vitesse de l'avion, $\vec{V_j}$ la vitesse *relative* (par rapport à

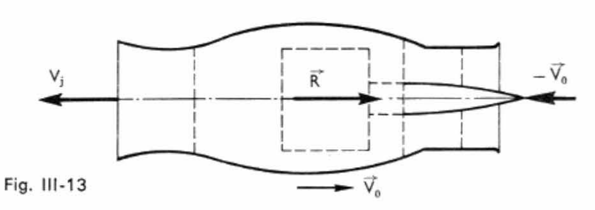


Fig. III-13

l'avion) d'éjection des gaz. Prenons comme repère un repère lié à l'avion supposé animé d'un mouvement rectiligne uniforme. L'air entre dans le réacteur à la vitesse $-\vec{V_0}$, et en sort (nous négligeons le débit-masse du combustible devant celui de l'air) à la vitesse $\vec{V_j}$. Le théorème d'Euler donne, en désignant par $\vec{R}$ la poussée du réacteur (opposée à la force de pression exercée par le réacteur sur les gaz) :

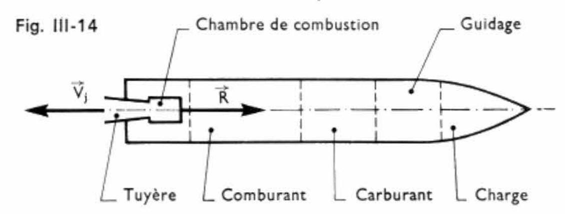
$$q_m\,\vec{V_j} + q_m\,.\,\vec{V_0} = -\vec{R}$$

soit en module, en tenant compte du sens des vecteurs :

$$R = q_m\,(V_j - V_0)$$

5.4. Poussée d'une fusée (fig. III-14). — La poussée d'une fusée se déduit de l'expression ci-dessus dans

Fig. III-14



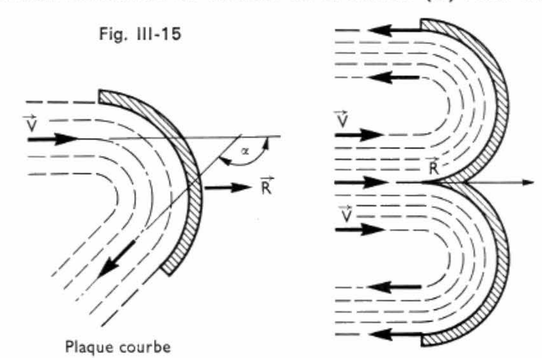
laquelle on fait $V_0 = 0$ (une fusée emporte le comburant avec le combustible et il n'y a donc pas entrée d'air) :

$$R = q_m\,V_j$$

Cette poussée est indépendante de la vitesse de la fusée. On montre (V. chap. 4, § 3.2 2°) qu'elle ne dépend que de la température absolue dans le moteur.

5.5. Action d'un jet sur une plaque courbe (fig. III-15). — Supposons que le jet cylindrique qui frappe la plaque immobile soit dévié d'un angle α, en conservant une section constante. Le module de la vitesse (V) reste donc

Fig. III-15



constant, et le théorème d'Euler donne, en désignant par R le module de la composante, de la force dans la direction initiale du jet :

$$R = q_m\,V\,(1 - \cos\alpha)$$

Sur un auget de turbine Pelton à l'arrêt, la déviation du jet est de 180°, et la force a pour valeur :

$$R = 2\,q_m\,V$$

5.6. Théorème de Kutta-Joukovski (fig. III-16). — Soit un objet cylindrique (aile d'avion d'envergure infinie, par exemple) placé dans un écoulement plan permanent,

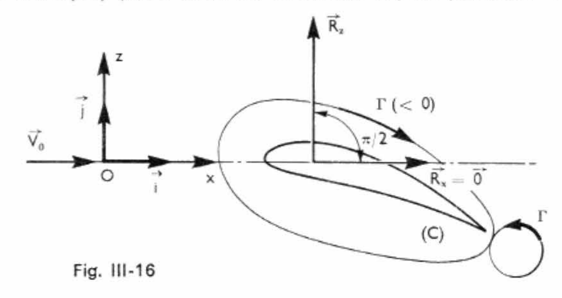


Fig. III-16

Fig. III-17

normal aux génératrices du cylindre ; supposons, en outre, que le champ de vitesses de cet écoulement soit irrotationnel en dehors de l'obstacle, que la vitesse à l'infini soit constante ($\vec{V_0}$) et que la circulation de la vitesse autour de l'obstacle soit égale à Γ ; le théorème de Kutta-Joukovski précise que l'obstacle est soumis de la part du fluide à une poussée dont la direction s'obtient en faisant tourner le vecteur $\vec{V_0}$ de $\frac{\pi}{2}$ rad en sens inverse de la circulation, et dont le module par unité de longueur a pour valeur $\rho V\Gamma$. Pour une aile d'avion, cette poussée est appelée *sustentation* ou *portance*. Il n'y a donc pas de composante dans le sens du mouvement : la *traînée* d'une aile cylindrique indéfinie est toujours nulle, résultat connu sous le nom de paradoxe de d'Alembert.

5.7. Hélice : théorie de Froude (fig. III-17). — L'hélice est assimilée à un disque immobile de surface S qui assure la mise en vitesse du fluide. Si V_1 et V_2 sont les vitesses à l'infini amont et aval, S_1 et S_2 les sections de la veine en amont et en aval, et V la vitesse au niveau de l'hélice, la conservation des débits permet d'écrire :

$$\rho S_1 V_1 = \rho S_2 V_2 = \rho S V, \text{ avec } V_2 > V_1 \text{ et } S_2 < S_1$$

et

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Les théorèmes de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement permettent d'obtenir la différence des pressions aval et amont :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2}\left(V_1^2 - V_2^2\right)$$

Dans le cas de l'hélice propulsive, la même relation s'applique, mais V_1 représente alors la vitesse du navire (ou la vitesse de l'eau par rapport au navire en amont de l'hélice) et V_2 la vitesse de l'eau (par rapport au navire) *derrière* l'hélice. La force propulsive de l'hélice est donc :

$$F = \frac{\rho S}{2}\left(V_1^2 - V_2^2\right)$$

CHAPITRE IV

DYNAMIQUE DES FLUIDES COMPRESSIBLES NON VISQUEUX

1. GÉNÉRALITÉS

Lorsque la vitesse d'écoulement d'un gaz devient importante (à titre indicatif : supérieure à 50 m/s), ses variations entraînent des variations de pression et de masse volumique non négligeables et les propriétés physiques du gaz sont modifiées. Les rappels de thermodynamique ci-après précisent les relations existant entre la pression p, la masse volumique ρ et la température T, ainsi que la définition des principales fonctions thermodynamiques (V. t. 1, Thermodynamique).

1.1. Gaz parfait. — C'est un gaz idéal qui satisfait : 1° à la loi de Mariotte : $pv = \frac{p}{\rho} =$ Cte si $T =$ Cte (v est le volume massique) ; 2° à la loi de Joule : l'énergie interne ne dépend que de la température et sa variation par unité de masse est donnée par la relation : $d\mathcal{U} = c_v\, dT$ (c_v est la chaleur massique à volume constant). De plus, il est supposé non visqueux : il n'y a aucun entraînement tangentiel entre filets fluides voisins de vitesses différentes, ni aucun frottement entre ces mêmes filets ou entre un filet et une paroi ; les actions de contact restent normales aux parois.

1.2. Énergie interne massique d'un fluide au repos. — Elle est la somme de toutes les énergies des molécules en mouvement contenues dans l'unité de masse du fluide et, en assimilant le fluide à un gaz parfait dont la chaleur massique à volume constant est indépendante de la température, elle s'exprime par la relation : $\mathcal{U} = c_v\, T$. Par hypothèse, ces propriétés s'étendent jusqu'à la température du zéro absolu, ce qui permet de fixer arbitrairement une origine.

1.3. Enthalpie massique (du grec *en thalpo :* chauffer dans). — C'est l'énergie interne massique d'un fluide en transvasement : elle représente en quelque sorte l'énergie emmagasinée sous forme mécanique et thermique. Pour un gaz parfait elle a pour expression :

$$H = \mathcal{U} + \frac{p}{\rho} = \mathcal{U} + r.T = \mathcal{U} + (c_p - c_v)\, T = c_p . T$$

avec : c_p, chaleur massique à pression constante ; $r = \frac{R}{M}$; R, constante des gaz parfaits ; M, masse molaire du gaz.

La relation ci-dessus est valable si les vitesses d'écoulement sont suffisamment petites pour que l'énergie cinétique soit négligeable : dans le cas contraire, elle prend la forme, connue sous le nom de formule de Zeuner :

$$H_i = H + \frac{V^2}{2}$$

H_i représente l'*enthalpie massique d'arrêt.*

1.4. Entropie massique (du grec *entropè :* retour). — La recherche de l'amélioration du rendement des moteurs thermiques a conduit Carnot et Clausius à définir la fonction *entropie*. Si un système reçoit la quantité de chaleur dQ d'une source de chaleur à la température T, la variation d'entropie est, par définition :

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Si le système passe d'un état 1 à un état 2, on calcule sa variation d'entropie en supposant que le passage s'effectue par une suite de transformations réversibles ; pendant chacune d'elles le système est en relation avec une source dont la température est égale à celle du système. La variation d'entropie est alors :

$$S_2 - S_1 = \int_{(1)}^{(2)} \frac{dQ}{T}$$

Une transformation réversible sans échange de chaleur avec l'extérieur est à entropie constante (transformation isentropique).

2. ÉQUATIONS GÉNÉRALES

2.1. Équation de continuité. — Elle résulte de l'application du principe de la conservation de la masse :

$$\rho S V = \text{Cte}$$

2.2. Équation de la quantité de mouvement. — Le principe de la conservation de la quantité de mouvement (V. chap. 3, § 2.1) appliqué à l'unité de masse donne l'équation :

$$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p$$

2.3. Équation de l'énergie. — La variation d'énergie totale (énergie interne + énergie cinétique) de l'unité de masse du fluide passant de l'état 1 à l'état 2 est égale à la somme du travail W et de la quantité de chaleur Q reçus par le fluide :

$$\left(U_2 + \frac{V_2^2}{2}\right) - \left(U_1 + \frac{V_1^2}{2}\right) = W + Q$$

2.4. Équation d'état. — Elle dépend de l'état du fluide. Pour un gaz parfait, la constante de Mariotte ayant pour valeur rT, l'équation d'état est :

$$\frac{p}{\rho} = rT$$

2.5. Équation de changement d'état. — Les écoulements peuvent être considérés en première approximation comme adiabatiques (c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur) ou comme isentropiques (ce qui suppose l'absence de frottement). Dans ce dernier cas, et pour un gaz parfait, l'équation de changement d'état est :

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \text{Cte, avec } \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

3. ÉCOULEMENTS MONODIMENSIONNELS

Différentions les équations précédentes, dans l'hypothèse d'un écoulement isentropique de direction bien déterminée :

— *Équation de continuité :*

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{dV}{V} = 0$$

— *Équation de la quantité de mouvement : U* étant la fonction de forces dont dérivent les forces de volume, nous avons vu (V. chap. 3, § 2.2) que :

$$V\frac{dV}{ds} + \frac{dU}{ds} + \frac{1}{\rho}\frac{dp}{ds} = 0$$

ce qui peut s'écrire, en supposant que la fonction de forces est constante :

$$d\left(\frac{V^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} = 0$$

— *Équation de l'énergie :*

$$d\mathcal{U} + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = dW + dQ$$

Or : $$dQ = 0 \quad \text{et} \quad dW = -d\left(\frac{p}{\rho}\right)$$

Alors : $$d\mathcal{U} + d\left(\frac{p}{\rho}\right) + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0$$

soit : $$dH + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0$$

— *Équation d'état :*

$$\frac{dp}{p} + \frac{d\rho}{\rho} = r\frac{dT}{T}$$

— *Équation de changement d'état* (γ = Cte) :

$$\frac{dp}{p} + \gamma\frac{d\rho}{\rho} = 0$$

3.1. Relation de Hugoniot. — A partir des relations précédentes, on établit la relation qui lie la variation de la vitesse du fluide à la variation de l'aire S de la section de la conduite :

$$\frac{dS}{S} + \left(1 - \frac{\rho}{\gamma p}V^2\right)\frac{dV}{V} = 0$$

Or, on montre que le quotient $\frac{\rho}{\gamma p}$ représente l'inverse de la vitesse du son dans le fluide considéré. En effet, la vitesse du son a est donnée par la relation :

$$a = \sqrt{\gamma r T} = \sqrt{\gamma\frac{p}{\rho}}$$

La relation vue ci-dessus s'écrit donc :

$$\frac{dS}{S} + \left(1 - \frac{V^2}{a^2}\right)\frac{dV}{V} = 0$$

C'est la *relation de Hugoniot*, qui montre que :

1° *En régime subsonique* ($V < a$), la vitesse croît lorsque la section diminue (écoulement dans un convergent) et réciproquement elle décroît lorsque la section augmente (écoulement dans un diffuseur).

2° *En régime supersonique* ($V > a$), un élargissement de la section entraîne un accroissement de la vitesse et réciproquement.

3° *La vitesse du son* ne peut être atteinte que lorsque $dS = 0$, c'est-à-dire en une section d'aire maximale ou minimale ; physiquement, la vitesse du son n'est obtenue que pour une aire minimale.

3.2. Relation de Barré de Saint-Venant. — Intégrée de l'état générateur (indice i) où la vitesse est nulle (par exemple : fluide sous pression au repos dans un grand réservoir), à un état quelconque de vitesse V, l'équation de l'énergie donne :

$$\frac{V^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\cdot\frac{p}{\rho} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\cdot\frac{p_i}{\rho_i}$$

Il est souvent intéressant de rechercher la vitesse d'un écoulement isentropique à partir des mesures de la pression statique locale p et de la pression génératrice p_i ; en introduisant l'équation de transformation isentropique : $\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_i}{\rho_i^\gamma}$,

la vitesse s'écrit :

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\frac{p_i}{\rho_i}\left[1 - \left(\frac{p}{p_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

Les autres caractéristiques du gaz : ρ et T, se calculent de la même façon en appliquant les relations :

$$\frac{T}{T_i} = \left(\frac{p}{p_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\rho}{\rho_i}\right)^{\gamma-1}$$

Remarques :

1° En un point d'arrêt, le fluide (gaz parfait) est ramené à vitesse nulle en subsonique ; pression, température et masse volumique retrouvent les valeurs qu'elles avaient à l'état générateur (indice i). Il est donc possible de mesurer localement p_i par une prise de pression d'arrêt. En supersonique, il faut mesurer p_i, à l'endroit où existe l'état générateur (V. § 4.2, 3°).

2° V a une limite supérieure (pour $p = 0$, détente complète, fusée dans le vide, par exemple) qui ne dépend que de T_i :

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\frac{p_i}{\rho_i}} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}rT_i} = 2{,}24\,a_i$$

3° Dans les équations de l'écoulement on fait intervenir de préférence le *nombre de Mach M* $\left(M = \frac{V}{a}\right)$.

En fonction de ce nombre de Mach, les rapports $\frac{T}{T_i}$, $\frac{p}{p_i}$, et $\frac{\rho}{\rho_i}$ s'écrivent, par exemple :

$$\frac{T}{T_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{-1}$$

$$\frac{p}{p_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{\gamma - 1}$$

4° La pression cinétique définie en dynamique incompressible (V. chap. 3, § 3.2) est égale :

$$\rho \frac{V^2}{2} = p_p - p \qquad (1)$$

Elle s'écrit en écoulement compressible isentropique :

$$\gamma \frac{pM^2}{2} = p_i - p \quad (\text{car} : p_p = p_i)$$

et :

$$\rho \frac{V^2}{2} = a^2 . \frac{\rho}{2} . \frac{V^2}{a^2} = \frac{\gamma \rho r T}{2} M^2 = \frac{p \gamma M^2}{2}$$

La seconde relation donnant $\frac{p}{p_i}$ (V. § 3.2, 3°), peut s'écrire sous la forme d'un développement limité :

$$\frac{p_i}{p} = 1 + \frac{\gamma}{2} M^2 + \frac{\gamma}{8} M^4 + \frac{\gamma (2 - \gamma)}{48} M^6 + \ldots$$

soit :

$$\frac{p_i - p}{p \frac{\gamma M^2}{2}} = 1 + \frac{M^2}{4} = \frac{2 - \gamma}{24} M^4 + \ldots \qquad (2)$$

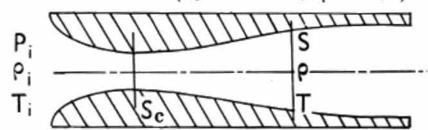
L'écart des résultats fournis par les formules (1) et (2) sur le terme K_p au point d'arrêt est de 1 % pour $M = 0{,}2$; 6,3 % pour $M = 0{,}5$ et est supérieur à 22 % pour $M = 0{,}9$. Cela justifie l'utilisation de la relation de Barré de Saint-Venant afin de déterminer la vitesse dans un écoulement compressible à partir des mesures de p_i et p.

3.3. État critique. — L'état critique est l'état du gaz animé d'une vitesse égale à celle du son. Pour l'air et les gaz diatomiques avec : $\gamma = 1{,}4$, les caractéristiques du fluide dans cet état (indice c), rapportées à celles de l'état générateur (indice i), sont :

$$\frac{p_c}{p_i} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 0{,}528 \qquad \frac{\rho_c}{\rho_i} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} = 0{,}634$$

$$\frac{T_c}{T_i} = \frac{2}{\gamma + 1} = 0{,}833 \qquad \frac{a_c}{a_i} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{1/2} = 0{,}912$$

3.4. Écoulement dans une tuyère. — Des tables d'écoulement isentropiques donnent les grandeurs caractéristiques d'un fluide compressible s'écoulant dans une tuyère dont la section critique (réelle ou fictive) est S_c. Ainsi les figures IV-1 et IV-2 donnent la table et les courbes relatives à l'air ($T_i = 288$ K, $\gamma = 1{,}4$).



M	$\frac{p}{p_i}$	$\frac{p_i}{p}$	$\frac{\rho}{\rho_i}$	$\frac{T}{T_i}$	$\frac{S}{S_c}$
0	1	1	1	1	∞
0,1	0,993 0	1,007	0,995	0,998 0	5,822
0,5	0,843 0	1,186	0,885	0,952 4	1,340
1	0,528 3	1,893	0,633 9	0,833 3	1
2	0,127 8	7,824	0,230 0	0,555 6	1,688
3	0,027 2	36,76	0,076 23	0,357 1	4,235
4	0,006 59	151,74	0,027 66	0,238 1	10,72
5	0,001 890	529,10	0,011 34	0,166 7	25,00
6	0,000 633	1 579,7	0,005 194	0,122 0	53,18
7	0,000 242	4 132,2	0,002 609	0,092 6	104,1
8	0,000 102 4	9 765,6	0,001 414	0,072 5	190,1
9	0,000 047 4	21 097,0	0,000 815	0,058 1	327,2
10	0,000 023 6	42 372,8	0,000 495	0,047 6	535,9

Fig. IV-1

4. ONDES DE CHOC PLANES

4.1. Propagation d'une perturbation infiniment petite. — Une perturbation de pression infiniment petite se propage dans le fluide compressible à la vitesse du son a.

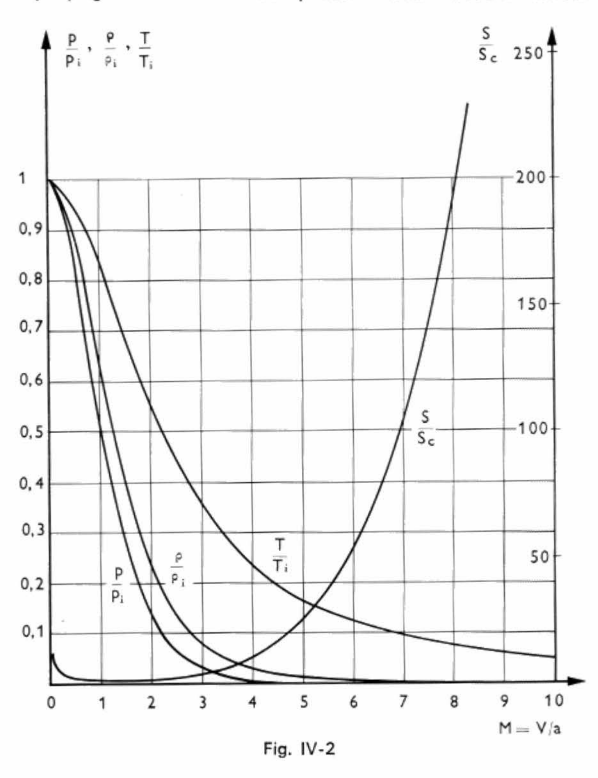


Fig. IV-2

Lorsque la source qui émet cette perturbation se déplace par rapport au fluide à la vitesse V (piston dans un cylindre de longueur infinie : fig. IV-3 ; avion dans l'air : fig. IV-4), la perturbation se propage, par rapport à la source, à la vitesse résultante : $V - a$ dans le sens du

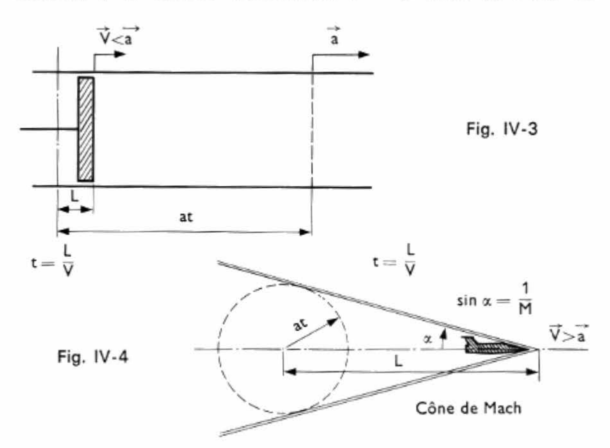


Fig. IV-3

Fig. IV-4

mouvement et $V + a$ dans le sens opposé. Supposons le mouvement de la source rectiligne. Pour $V < a$ (régime *subsonique*) la perturbation s'éloigne de la source dans chaque direction. Pour $V > a$ (régime *supersonique*) les diverses ondes sphériques émises par la source admettent un cône enveloppe ; la zone perturbée reste localisée à l'intérieur de ce cône, les ondes de compression se concentrant sur la surface de ce cône en accumulant l'énergie qu'elles transportent. Ce cône, dit *cône de Mach*, a pour demi-angle au sommet α tel que :

$$\sin \alpha = \frac{a}{V} = \frac{1}{M}$$

L'onde qu'il transporte est l'*onde de Mach*, ou *onde de choc*.

4.2. Onde de choc normale dans une tuyère. — Lorsqu'un fluide s'écoule dans une tuyère, les aspérités des parois de celle-ci, comme les obstacles (sondes de pression, par exemple) que rencontre le fluide, font naître des ondes de choc. Ces ondes se réfléchissent sur les parois. L'étude théorique du phénomène est complexe. Cependant, l'étude en soufflerie montre qu'en aval de l'obstacle qui a produit la perturbation existe une *onde de recompression*, stationnaire, pratiquement plane et normale à la direction de la vitesse du fluide. Cette onde constitue une surface de discontinuité pour V, ρ, p et T. Affectons des indices 1 ou 2 à ces grandeurs selon qu'elles sont calculées en amont ou en aval de l'onde de recompression (fig. IV-5). Les calculs

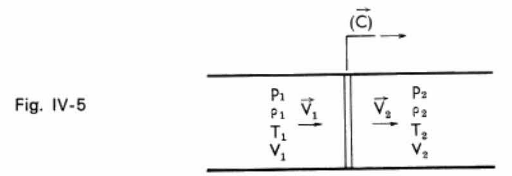


Fig. IV-5

effectués à partir des relations générales vues plus haut conduisent à un ensemble de relations importantes dont voici les principales, M_1 représentant le nombre de Mach en amont de l'onde de recompression et a_c la vitesse du son au col de la tuyère :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma - 1)\, p_1 + (\gamma + 1)\, p_2}{(\gamma - 1)\, p_2 + (\gamma - 1)\, p_1}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\,\gamma\, M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\gamma + 1 + \frac{p_2}{p_1}(\gamma - 1)}{\gamma + 1 + \frac{p_1}{p_2}(\gamma - 1)}$$

$$V_1 V_2 = a_c^2$$

Cette dernière relation, appelée *relation de Prandtl*, montre que puisque V_1 est supérieur à a_c, V_2 est inférieur à a_c : l'écoulement après le choc est subsonique.

Une sonde de pression placée dans un fluide en vitesse supersonique ne mesure pas la pression d'arrêt p_i, identique à la pression génératrice, mais une pression p'_i, qui est la pression d'arrêt *derrière* l'onde de choc provoquée par la sonde. On montre que :

$$\frac{p'_i}{p_i} = \frac{\frac{\gamma + 1}{2} M_1^2 \left[\frac{(\gamma + 1)^2 M_1^2}{4\,\gamma\, M_1^2 - 2\,(\gamma - 1)}\right]^{\frac{1}{\gamma - 1}}}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}$$

Ce rapport est très voisin de 1 tant que M est inférieur à 1,2 permettant de considérer les chocs faibles comme quasi isentropiques ; ce rapport décroît très vite quand M croît (0,72 pour $M = 2$; 0,33 pour $M = 3$ et 0,14 pour $M = 4$). Cette perte relative de pression traduit la dissipation d'énergie mécanique au travers de l'onde choc. Toutefois la température d'arrêt se conserve : $T'_i = T_i$.

4.3. Onde de choc oblique attachée. — Quand un écoulement supersonique est brusquement dévié d'un angle θ (fig. IV-6), une onde de choc prend naissance, dont le plan est incliné d'un angle δ sur la direction de l'écoulement amont : cette onde, pour des valeurs de θ inférieures à une valeur limite θ_{max}, est stationnaire et passe par l'arête du dièdre. L'application des équations générales montre que la composante de la vitesse parallèle à l'onde se conserve à la traversée de l'onde. Il s'ensuit que l'onde est perpendiculaire au vecteur $(\vec{V_1} - \vec{V_2})$ (V. fig. IV-6). Les valeurs de $\frac{p_2}{p_1}$, $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, $\frac{T_2}{T_1}$ sont tirées des tableaux et des courbes vus précédemment pour l'onde normale : il suffit de remplacer M_1 par $M_1 \sin \delta$. Des méthodes graphiques ont été proposées, telle que celle des *polaires de choc*, de Busemann.

La recompression par choc oblique permet un meilleur rendement énergétique que celle par choc droit.

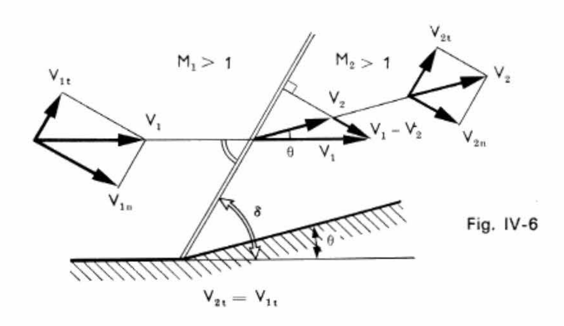


Fig. IV-6

4.4. Onde de choc oblique détachée. — Si la déviation de l'écoulement est supérieure à la limite θ_{max}, l'onde oblique se détache de l'arête de déviation et se raccorde à la paroi par une onde courbe stationnaire derrière laquelle : $M < 1$. De même, à l'avant d'un obstacle (fig. IV-7), il existe une onde courbe CD qui ramène l'écoulement en régime subsonique dans la zone ($ABCD$).

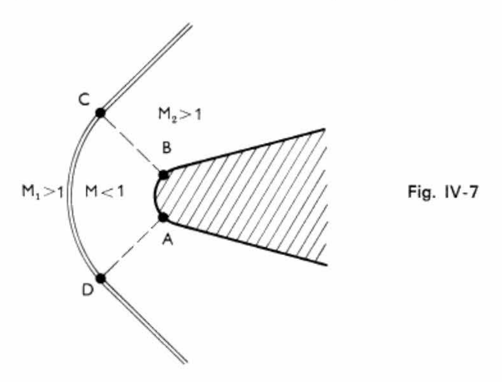


Fig. IV-7

4.5. Réflexion d'ondes de choc planes. — L'onde de choc $(\vec{C_1})$ qui atteint une paroi matérielle sous un angle δ_1 (fig. IV-8) se réfléchit sur celle-ci en donnant naissance à une onde de choc $(\vec{C_2})$ qui fait un angle δ_2 dont la valeur dépend du nombre de Mach M_1 (lui-même fonction de M et de δ_1).

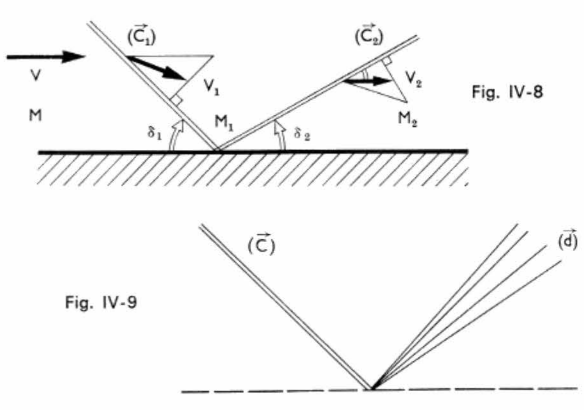


Fig. IV-8

Fig. IV-9

Les composantes tangentielles se conservent et les composantes normales se calculent comme au paragraphe 4.3.

Lorsque une onde de choc $(\vec{C})$ rencontre une surface isobare, elle se réfléchit sous forme d'onde de détente $(\vec{d})$ (fig. IV-9) comme dans le cas de la détente de Prandtl-Meyer (V. § 5).

4.6. Réfraction d'ondes de choc planes (fig. IV-10). Ce phénomène est observé au croisement de deux ondes Δ_1 et Δ_2 : les deux ondes sont déviées, Δ_1 en Δ'_1, Δ_2 en Δ'_2,

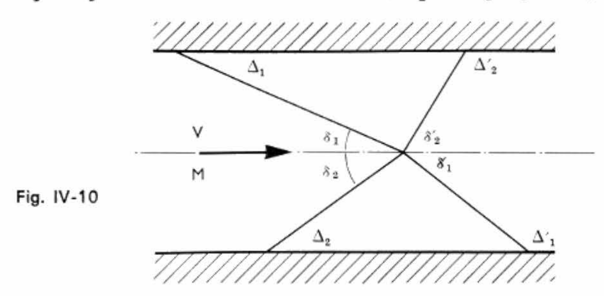


Fig. IV-10

5. DÉTENTE DE PRANDTL-MEYER

La détente est un phénomène continu et réversible : on l'observe, par exemple, lorsque l'écoulement est dévié d'un angle θ, l'angle du dièdre formé par les deux plans de la conduite étant cette fois supérieur à π (fig. IV-11). À la place de l'onde de recompression des paragraphes 4.2 et 4.3 se forme une zone de *détente*, limitée par des plans dont les traces sur le plan perpendiculaire à l'arête O sont les lignes de Mach m_1 et m_2. À l'extérieur de cette zone, M, V, p, ρ sont bien déterminés.

5.1. Détente d'un écoulement amont sonique (fig. IV-12). — Si la détente se fait à partir d'un écoulement sonique, la ligne de Mach Om_1 est normale en O à la face amont du dièdre, la ligne de Mach Om_2 fait un angle α avec la face aval du dièdre et le nombre de Mach M_2 est fonction du paramètre $\omega = \frac{\pi}{2} + \theta - \alpha$. Il existe des tables et courbes de détente donnant α, M_2, $\frac{p_2}{p_1}$ . . . en fonction de θ : elles mettent en évidence un angle θ limite pour lequel la pression p_2 est nulle (détente jusqu'au vide) et les lignes de Mach se confondent alors avec les lignes de courant.

5.2. Détente d'un écoulement amont supersonique (fig. IV-13). — Il peut être assimilé à un écoulement sonique déjà détendu de $M_0 = 1$ à M_1 par une déviation θ_1 autour de la même arête (θ_1 correspondant à M_1) et qui se détendrait de $M_0 = 1$ à M_2 par une déviation $\theta_2 = \theta_1 + \theta(M_2$ fonction de $\theta_2)$. C'est ainsi que l'on calcule l'écoulement supersonique dans une tuyère existante. Réciproquement, on détermine les formes géométriques des parois d'une tuyère destinée à une détente donnée, en prenant, entre arêtes successives, un pas de variation du nombre de Mach suffisamment fin pour éliminer les facettes qui nuiraient à la qualité de l'écoulement.

Fig. IV-11

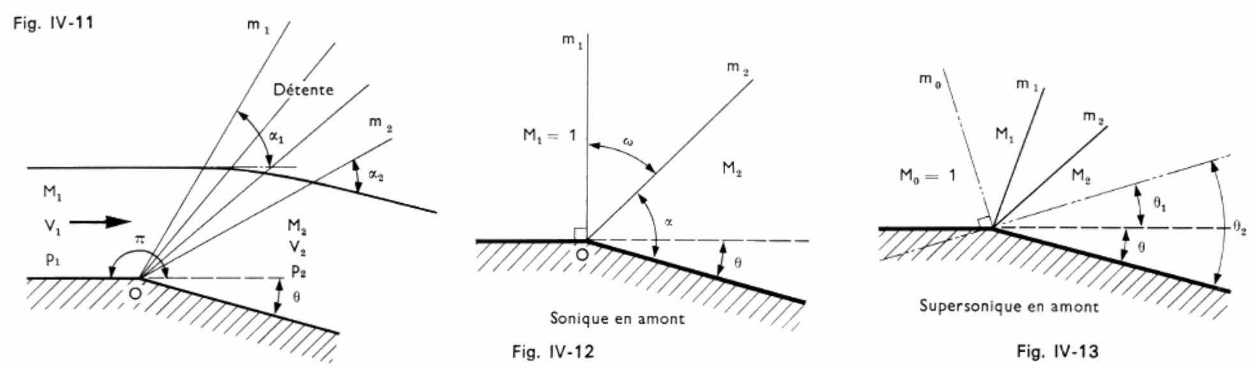


Fig. IV-12

Fig. IV-13

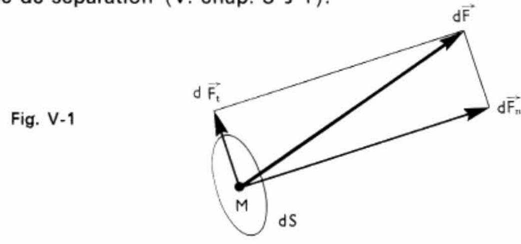
CHAPITRE V

DYNAMIQUE DES FLUIDES VISQUEUX INCOMPRESSIBLES

1. DÉFINITIONS ET GÉNÉRALITÉS

1.1. La viscosité : forces et coefficients. — Dans le fluide parfait les actions de contact qui se développent entre deux couches voisines sont normales à l'élément de surface de séparation (V. chap. 3 § 1).

Fig. V-1



Mais les fluides réels sont *visqueux*; les actions de contact ne sont plus normales ; elles admettent une composante dans le plan de la surface, appelée *force de viscosité*. Ainsi, sur la figure V-1, la force $\overrightarrow{dF}$ s'exerçant sur l'élément de surface dS admet la composante normale $\overrightarrow{dF_n}$ et la composante tangentielle $\overrightarrow{dF_t}$ qui est la force de viscosité.

1° *Viscosité dynamique.* — Considérons une tranche de fluide d'épaisseur dy (fig. V-2) dans laquelle les différentes couches glissent les unes sur les autres, le plan P_f étant animé de la vitesse u, le plan P_m de la vitesse $u + du$.

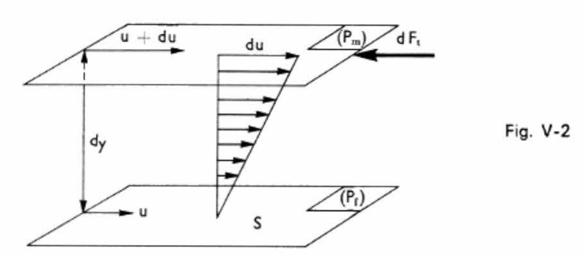


Fig. V-2

La force de viscosité dF_t s'exerçant (en sens inverse du mouvement relatif de P_m par rapport à P_f) sur l'élément de plan P_m d'aire dS a pour expression :

$$dF_t = - \mu \frac{du}{dy} dS$$

μ est le *coefficient de viscosité dynamique*.

Valeurs des coefficients de viscosité dynamique et cinématique pour quelques liquides et gaz usuels

Liquides à 20 °C		μ 10^{-3} N. s/m²	ν 10^{-6} m²/s
Alcool éthylique pur	C_2H_5OH	1,20	1,52
Air liquide		0,127	
Eau pure	H_2O	1,006	1,008
Ether		0,233	0,317
Glycérine pure	$C_3H_5(OH)_3$	800	635
Huile d'olive		84	91
Mercure		1,55	0,115

Gaz		μ 10^{-5} N. s/m²	ν 10^{-6} m²/s
Air sec à	20 °C	1,82	15,1
Eau vapeur	20 °C	0,97	562
	100 °C	1,25	
	200 °C	1,63	
	400 °C	2,41	
Gaz carbonique	20 °C	1,48	8,14
Méthane	20 °C	1,09	16,5

On pose souvent: $\tau = -\mu \dfrac{du}{dy}$

τ est la contrainte de cisaillement; elle correspond à la limite de la force tangentielle de frottement exercée par unité de surface lorsque celle-ci tend vers zéro.

D'où:

$$dF_t = \tau \, dS$$

Le coefficient μ s'exprime à l'aide d'une unité qui est le newton-seconde par mètre carré (N.s/m²).

La théorie cinétique des gaz montre que μ est proportionnel à la vitesse quadratique moyenne $\bar{c}$ et au libre parcours moyen $\bar{l}$ des molécules, ainsi qu'à la masse volumique du gaz: $\mu = k.\bar{c}.\bar{l}$, avec k voisin de 0,5.

La viscosité dynamique est très influencée par la température:

— *pour les gaz*, elle suit la loi de Sutherland:

$$\mu = \frac{K\sqrt{T}}{1 + \dfrac{C}{T}}$$

avec : T, température absolue, C et K, constantes dépendant du gaz (fig. V-3);

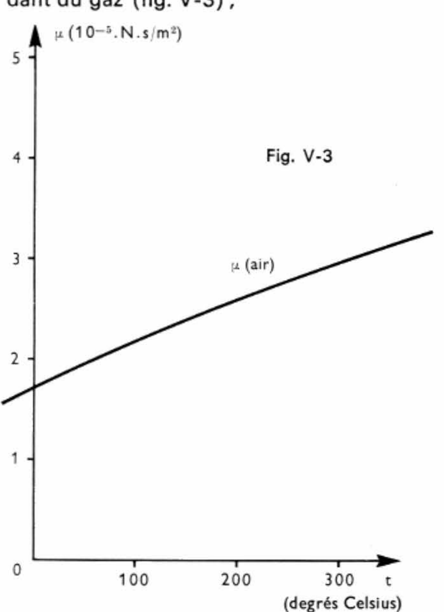


Fig. V-3

— *pour les liquides*, μ décroît quand la température croît suivant la loi de Walther (fig. V-4):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = e^{\left(\frac{T_0}{T}\right)^m}$$

La viscosité dynamique des liquides croît avec la pression, suivant une fonction quasi exponentielle, doublant de valeur de 1 à 300 bars. La viscosité dynamique des gaz reste pratiquement constante quand la pression varie.

2° *Viscosité cinématique*. — Le coefficient de viscosité cinématique est le rapport: $\nu = \dfrac{\mu}{\rho}$, dont l'unité dans le système international est le mètre carré par seconde (m²/s). Quelques valeurs sont données dans le tableau ci-dessus.

1.2. Conséquences énergétiques de la viscosité. — Le mouvement d'un élément de volume de fluide peut être considéré comme la somme d'une translation, d'une rotation et d'une déformation, cette dernière résultant d'une torsion et d'une dilatation. Évaluons la puissance mise en jeu lors de la torsion (fig. V-5) dont l'axe est parallèle à Oz (perpendiculaire au plan de figure). Le moment du couple de torsion a pour valeur: $\Gamma = dF_t.dy$, et l'angle de torsion par unité de temps est: $\theta = \dfrac{du}{dy}$. La puissance mise en jeu est donc:

$$P = -\Gamma\theta = \mu \left(\frac{du}{dy}\right)^2 dx\,dy\,dz$$

soit, par unité de volume:

$$\Phi = \mu \left(\frac{du}{dy}\right)^2$$

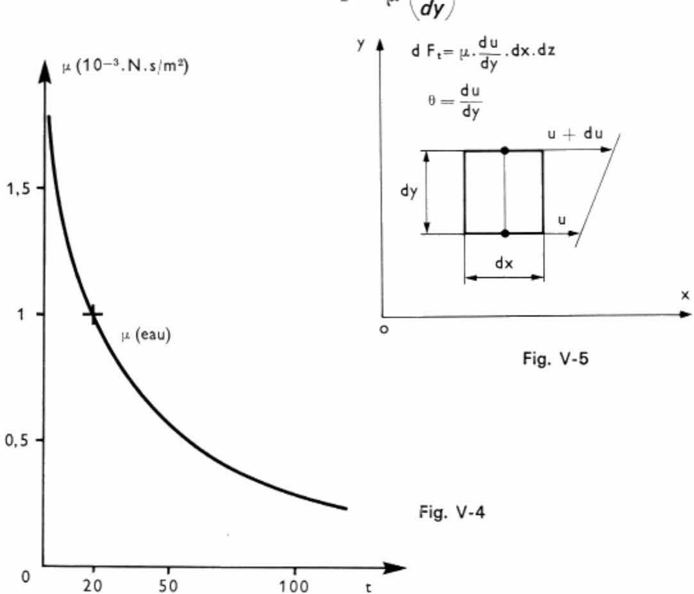


Fig. V-4

Fig. V-5

Pour l'ensemble du mouvement de l'élément du volume dans les trois dimensions de l'espace, on montre que la puissance dissipée par unité de volume est donnée par la fonction suivante, dite *fonction de dissipation*:

$$\Phi = \mu \left[2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right]$$

1.3. Équation dynamique du fluide visqueux incompressible. — Cette équation se déduit de celle du chapitre 3 (§ 2.1). Il suffit d'ajouter la force de viscosité $\vec{f}$ qui s'exerce sur l'unité de masse du fluide :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p + \vec{f}$$

Évaluons cette force pour un écoulement plan de vitesse parallèle à Ox (fig. V-6). Comme u est fonction de z seul,

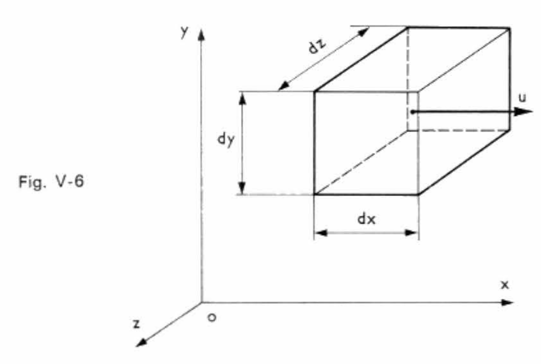


Fig. V-6

seules les faces supérieure et inférieure sont soumises aux forces de viscosité, qui sont :

$$\text{face supérieure : } \mu\left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)\frac{dz}{2}\right] dx\,dy$$

$$\text{face inférieure : } -\mu\left[\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)\frac{dz}{2}\right] dx\,dy$$

soit la force résultante *horizontale :*

$$\mu\,\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\,.\,dx\,dy\,dz$$

La force par *unité de volume* est donc $\mu \dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ et, par *unité de masse :*

$$f = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Si la vitesse $\vec{V}$ est quelconque, on trouve que les trois composantes de la force de viscosité sont :

$$\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = \frac{\mu}{\rho}\,\Delta u$$

$$\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) = \frac{\mu}{\rho}\,\Delta v$$

$$\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) = \frac{\mu}{\rho}\,\Delta w$$

que l'on symbolise par l'expression vectorielle :

$$\vec{f} = \frac{\mu}{\rho}\,\Delta\vec{V}$$

($\Delta\vec{V}$ est le laplacien du vecteur $\vec{V}$)

L'équation générale s'écrit donc :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p + \frac{\mu}{\rho}\,\Delta\vec{V}$$

ou encore en faisant intervenir le coefficient de viscosité cinématique :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,p + \nu\,\Delta\vec{V}$$

1.4. Équations de Navier. — Elles se déduisent des équations d'Euler (V. chap. 3 § 2.1), auxquelles on ajoute les termes relatifs aux forces de viscosité :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} = X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\,\Delta u$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} = Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\,\Delta v$$

$$u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} = Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\,\Delta w$$

$$\text{avec } \Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2},\ \Delta v = \ldots,\ \Delta w = \ldots$$

1.5. Concept de couche limite. — Dans le cas d'un fluide à faible coefficient de viscosité, on peut considérer le fluide comme parfait, sauf au voisinage immédiat des parois où le gradient de vitesse est très élevé. En effet, les molécules de fluide en contact des parois ont une vitesse nulle. Il existe donc, entre la paroi et la zone où le fluide peut être considéré comme libre, une zone où la vitesse varie très rapidement et où les forces de viscosité sont prépondérantes. C'est la *couche limite* (V. § 3).

2. DYNAMIQUE DES LIQUIDES VISQUEUX

2.1. Écoulement dans une conduite cylindrique

1° *Profil des vitesses dans un écoulement laminaire.* Un écoulement est dit *laminaire* si les filets de fluide sont nettement distincts, donc s'il n'apparaît en aucun point du fluide de phénomène de turbulence. Dans une conduite cylindrique, ce mouvement se caractérise par une vitesse $\vec{V}$ parallèle en tout point aux génératrices du cylindre.

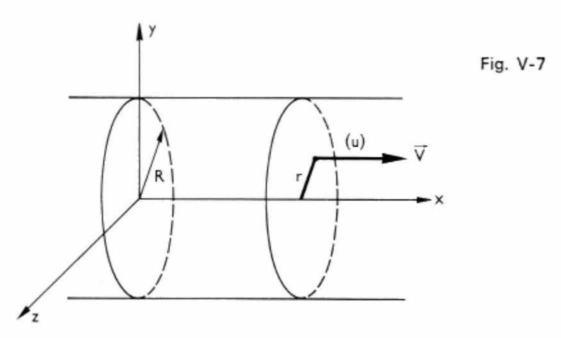


Fig. V-7

Supposons la conduite horizontale, à section circulaire de rayon R, et parallèle à Ox (fig. V-7). La première équation de Navier donne, en régime permanent $\left(\dfrac{\partial u}{\partial t} = 0\right)$:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\,\Delta\,u$$

(il n'est pas nécessaire de faire intervenir le poids — seule force de volume — puisque la conduite est horizontale). À cause de la symétrie de révolution, u ne dépend que de r, distance du point considéré à l'axe Ox.

Donc : $\dfrac{\partial u}{\partial x} = 0$. Par ailleurs, on montre que :

$$\Delta u = \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} = \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{du}{dr}\right)$$

En définitive, l'équation s'écrit, en remplaçant ν par $\dfrac{\mu}{\rho}$ et en simplifiant :

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{du}{dr}\right) = 0$$

ou encore, en admettant que la pression est constante dans une section droite :

$$\frac{r}{\mu}\frac{dp}{dx} = \frac{d}{dr}\left(r\frac{du}{dr}\right)$$

Une première intégration par rapport à r donne, puisque $\dfrac{dp}{dx}$ est constant :

$$\frac{r^2}{2\mu}\frac{dp}{dx} = r\frac{du}{dr} + C_1$$

(avec $C_1 = 0$ car les deux membres doivent s'annuler pour $r = 0$).

D'où :
$$\frac{du}{dr} = \frac{r}{2\mu}\frac{dp}{dx}$$

Une deuxième intégration donne :

$$u = \frac{r^2}{4\mu}\frac{dp}{dx} + C_2$$

La vitesse étant nulle sur la paroi ($u = 0$ pour $r = R$), on voit que $C_2 = -\frac{R^2}{4\mu}\frac{dp}{dx}$. En définitive :

$$u = -\frac{1}{4\mu}\frac{dp}{dx}(R^2 - r^2)$$

Le profil des vitesses est donc une parabole (fig. V-8).

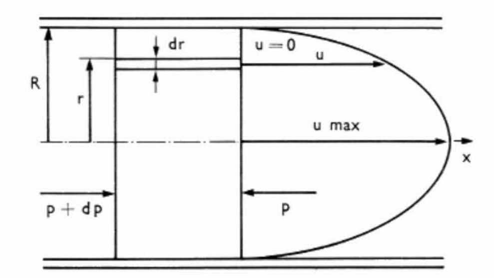


Fig. V-8

La vitesse u étant positive, $\frac{dp}{dx}$ est négatif : la pression décroît dans le sens de l'écoulement.

2° *Formule de Poiseuille. Perte de charge.* — Le débit volumique dans un anneau d'épaisseur dr et de rayon r (fig. V-8) est :

$$dq_v = -\frac{\pi}{2\mu}\frac{dp}{dx}(R^2 - r^2)\,dr$$

et pour l'ensemble de la section :

$$q_v = -\frac{\pi}{8\mu}\frac{dp}{dx}R^4$$

soit en fonction du diamètre D :

$$\boxed{q_v = -\frac{\pi}{128\mu}\frac{dp}{dx}D^4} \quad \text{(formule de Poiseuille)}$$

La vitesse moyenne $\bar{u}$, que nous désignerons dorénavant par U, a donc pour expression :

$$U = \frac{q_v}{\pi R^2} = -\frac{R^2}{8\mu}\frac{dp}{dx}$$

La vitesse est maximale sur l'axe du tuyau, où elle a pour valeur : $u_{\max} = -\frac{R^2}{4\mu}\frac{dp}{dx}$.

On voit que : $\quad U = \frac{u_{\max}}{2}$

La diminution de pression représente la *perte de charge*. Le débit volumique étant constant, la perte de charge est proportionnelle à l'abscisse. Sur une longueur l du tuyau, la perte de charge est :

$$\Delta p = \int_0^l (-dp) = \int_0^l \frac{8\mu U}{R^2}dx = \frac{8\mu U l}{R^2}$$

La *perte de charge unitaire* a pour valeur :

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{8\mu}{R^2}U = \frac{32\mu}{D^2}U$$

3° *Nombre de Reynolds.* — On appelle nombre de Reynolds un nombre sans dimension, produit d'une vitesse, d'une longueur, et de l'inverse du coefficient de viscosité cinématique :

$$\mathcal{R} = \frac{VL}{\nu}$$

On montre que la nature de l'écoulement dépend de la valeur de ce nombre de Reynolds. Un nombre de Reynolds petit caractérise des forces de viscosité prépondérantes : l'écoulement est *laminaire*.

Lorsque le nombre de Reynolds dépasse une certaine valeur limite, caractéristique du fluide, l'écoulement devient *turbulent*. Pour les conduites cylindriques, on peut faire apparaître ce nombre de Reynolds à partir de la perte de charge unitaire. On appelle *coefficient de perte de charge unitaire* le nombre (sans dimension) :

$$\lambda = \frac{2D}{\rho U^2}\frac{\Delta p}{l}$$

Remplaçons $\frac{\Delta p}{l}$ par sa valeur (V. § 2.1) :

$$\lambda = 64\frac{\mu}{\rho}\frac{1}{UD} = 64\frac{\nu}{UD}$$

On peut prendre précisément comme nombre de Reynolds : $\mathcal{R} = \frac{UD}{\nu}$.

Alors : $\quad \lambda = 64\,\mathcal{R}$

2.2. Résultats expérimentaux (conduites cylindriques). — L'étude expérimentale des écoulements en conduites cylindriques a fait l'objet de nombreux travaux. Les recherches de Poiseuille, Darcy, Bazin, Boussinesq, Hagen, Reynolds et Nikuradse ont mis en évidence l'existence des régimes d'écoulements laminaire et turbulent et les conditions de passage de l'un à l'autre. Ils ont vérifié les lois théoriques en écoulement laminaire et ont établi des lois semi-empiriques régissant les écoulements dans les conduites lisses ou rugueuses et dans les canaux à surface libre.

1° *Expérience de Schiller-Reynolds.* — L'écoulement est étudié dans un tube horizontal alimenté par un réservoir en charge et équipé d'une vanne permettant de faire varier la vitesse U. Le nombre de Reynolds est $\mathcal{R} = \frac{UD}{\nu}$, D étant le diamètre du tube. Aux faibles vitesses le régime est *laminaire*. À partir d'une certaine vitesse, donc d'un certain nombre de Reynolds dit *nombre de Reynolds critique* ($\mathcal{R}_c$) le régime devient *turbulent-lisse* (ondula-

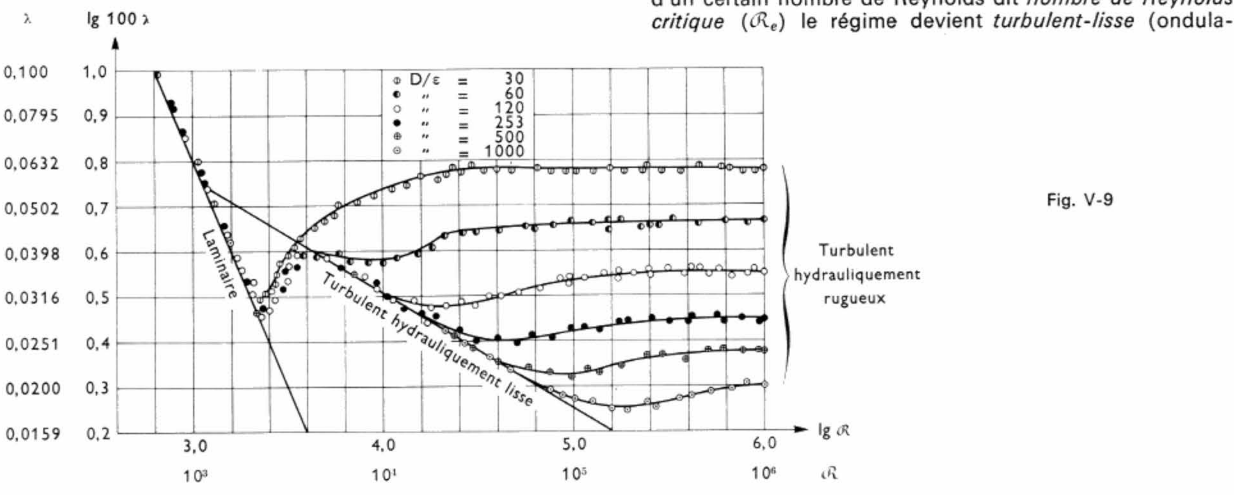


Fig. V-9

tions du filet fluide, diminution de l'amplitude du jet à la sortie). Puis le régime devient *turbulent-rugueux* : des tourbillons se produisent en de nombreux points.

2° *Influence de la rugosité des parois.* — Nikuradse a étudié l'influence sur l'écoulement de l'état des parois rendues rugueuses artificiellement par des grains de sable collés. Les *courbes de Nikuradse* (fig. V-9) représentent les variations du coefficient λ en fonction du nombre de Reynolds $\mathcal{R}$ (on porte en abscisses $\lg \mathcal{R}$ et en ordonnées $\lg 100\,\lambda$), chaque courbe correspondant à une valeur $\frac{D}{\varepsilon}$ donnée (D : diamètre de la conduite, ε : diamètre des grains).

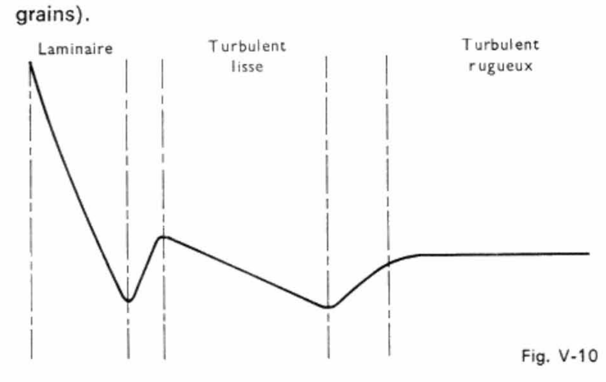


Fig. V-10

Pour une valeur moyenne de ε/D (*rugosité relative*) on distingue sur une courbe de Nikuradse (fig. V-10) trois régions successives :

a) la *droite de Poiseuille*, correspondant au régime laminaire, avec :

$$\lambda = \frac{64}{\mathcal{R}}$$

b) la *droite de Blasius*, pour le régime turbulent-lisse, avec :

$$\lambda = \frac{0{,}316}{\mathcal{R}^{1/4}} \quad \text{(valable pour } \mathcal{R} \leqslant 10^5\text{)}$$

et : $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg (\mathcal{R} \sqrt{\lambda}) - 0{,}8$ pour $\mathcal{R} > 10^5$ (formule de Karman).

c) Le palier pratiquement horizontal, pour le régime turbulent-rugueux dans le cas de conduite dont la rugosité est uniforme :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{D}{\varepsilon} + 1{,}14 \quad \text{(formule de Karman-Prandtl).}$$

La répartition des vitesses dans les régimes laminaire et turbulent-rugueux est donnée par la figure V-11.

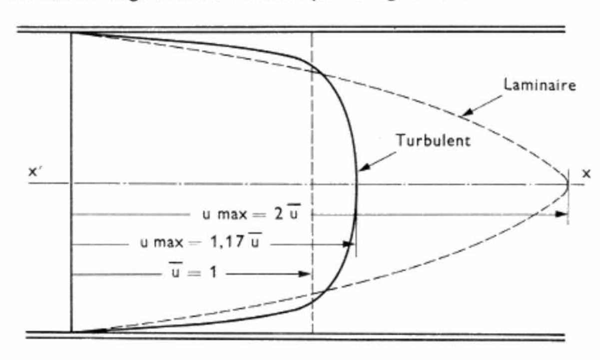


Fig. V-11 — $\bar{u}$ est la vitesse moyenne ($\bar{u} = U$)

3° *Passage du régime laminaire au régime turbulent.* Il est dû à un épaississement de la couche limite laminaire : la paroi ne joue plus alors son rôle d'orientation de façon efficace. Si, dans des conditions très particulières, on a pu conserver un écoulement laminaire jusqu'à des nombres de Reynolds de 40 000, il est généralement admis que la laminarité ne se conserve guère au-dessus de $\mathcal{R} = 2\,200$.

2.3. Écoulement dans les canaux découverts. — Il s'agit des rivières, des égouts et des canaux artificiels, où les dimensions et les vitesses sont telles que l'écoulement est turbulent. En désignant par C_f le coefficient de frottement relatif à la paroi, par R_h le *rayon hydraulique* :

$$R_h = \frac{S}{P} = \frac{\text{aire section}}{\text{périmètre mouillé}}$$

la relation exprimant l'égalité de la force de frottement et de la composante longitudinale du poids s'écrit, pour une longueur L :

$$C_f \frac{\rho U^2}{2} P L = i \rho g S L$$

i désignant la pente de la canalisation par rapport à l'horizontale.

D'où la vitesse débitante (formule de Chézy) est égale à :

$$U = \sqrt{\frac{2g}{C_f}} \sqrt{R_h \cdot i}$$

Le débit du canal est donc :

$$q_v = SU = S \sqrt{\frac{2g}{C_f}} \sqrt{R_h \cdot i}$$

qui peut s'écrire :

$$q_v = k \sqrt{i}$$

le coefficient k dépendant de la forme du canal, de la rugosité de ses parois, de son rayon hydraulique et de sa section.

La notion d'écoulement torrentiel sera abordée plus loin.

2.4. Pertes de charges singulières (conduites cylindriques). — Rappelons que l'on appelle *charge* d'un écoulement la somme $X = p + \rho\, yz + \rho \frac{V^2}{2}$ (V. chap. 3, § 2.2). Au voisinage des singularités géométriques d'une conduite — changements de direction ou coudes, bifurcations ou nœuds, variations de section brutales (diaphragmes, soupapes, etc.) — il y a décollement des lignes de courant et formation de tourbillons qui produisent une perte d'énergie. La charge X ne se conserve pas, comme dans le cas de l'écoulement permanent. Si X_1 est la charge en amont de la singularité et X_2 la charge en aval ($X_2 < X_1$), la quantité $X_1 - X_2$ est la *perte de charge*. Cette perte de charge, dite *singulière*, s'ajoute éventuellement à la perte de charge due à la viscosité du fluide.

1° *Rétablissement du régime permanent.* — La distance x de rétablissement du régime permanent à partir d'une perturbation est donnée par la formule proposée par Ribaud : $x = 0{,}8\, D\, \mathcal{R}^{1/4}$. x varie pratiquement entre 6 D et 60 D. Lorsqu'on veut faire une mesure dans un écoulement donné, il faut donc placer les appareils suffisamment loin des singularités.

2° *Calcul des pertes de charge.* — On constate expérimentalement que la perte de charge singulière est proportionnelle au carré de la vitesse. Elle peut être sous la forme :

$$\Delta X = K \rho \frac{U^2}{2}$$

K est le *coefficient de perte de charge singulière*.

Élargissement brusque (fig. V-12). La perte de charge est :

$$\Delta X = K_1 \rho \frac{U_1^2}{2} \quad \text{avec : } K_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

Ainsi, pour un jet débouchant dans un grand réservoir ($S_2 \approx \infty$) il vient : $\Delta X = \rho \frac{U_1^2}{2}$ ($K_1 = 1$).

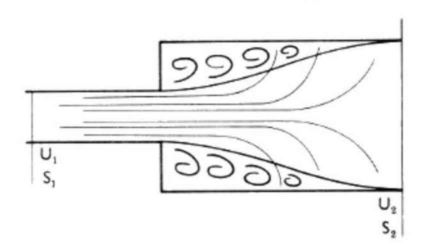


Fig. V-12

Fig. V-13

U_1 S_1 — U_2 S_2 — σ — Section contractée

Rétrécissement brusque
Orifice à bord vif

Ajutage de Borda

Pavillon « elliptique »

Rétrécissement brusque (fig. V-13). Il entraîne une perte de charge relativement plus faible que la précédente :

$$\Delta X = K_2 \rho \frac{U_2^2}{2} \quad \text{avec} : K_2 = \left(\frac{1}{C} - 1\right)^2$$

Le coefficient de contraction C est le rapport de la section contractée σ, due aux décollements situés en aval du raccordement des deux canalisations, à la section S_2.

L'entrée d'une conduite se traite comme un rétrécissement et le coefficient K_2 est compris entre 0 et 1 suivant la forme de l'orifice :

— ajutage de Borda (ou orifice rentrant) : $C = 0,5$ et $K_2 = 1$;
— orifice à bord vif : $C = 0,6$ et $K_2 = 0,5$;
— pavillon à génératrice parabolique (ou elliptique) : $C \approx 1$ et $K_2 \approx 0$.

Coudes (fig. V-14). Il s'y produit des écoulements transversaux dus au gradient de pression radial entraînant

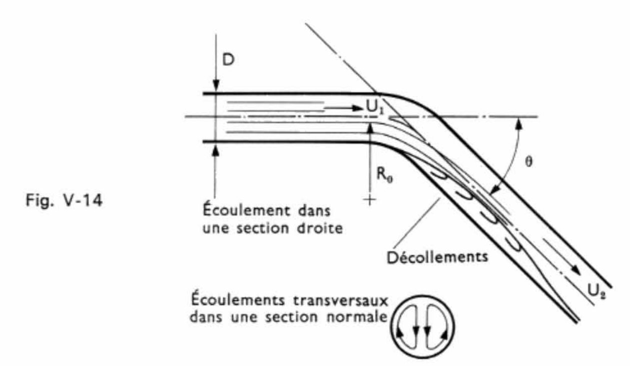


Fig. V-14

des frottements supplémentaires et parfois des décollements ; la perte de charge : $\Delta X = K \rho \frac{U^2}{2}$ fait intervenir un coefficient K fonction de l'angle θ, du rayon de courbure moyen R_0, du diamètre de la canalisation D et du nombre de Reynolds $\mathcal{R}$. Les courbes $K(\theta)$ pour $D = 2 R_0$ et $K\left(\frac{R_0}{D}\right)$ pour $\theta = 90°$ donnent des valeurs de K utilisables avec un grand nombre de Reynolds (fig. V-15 et V-16).

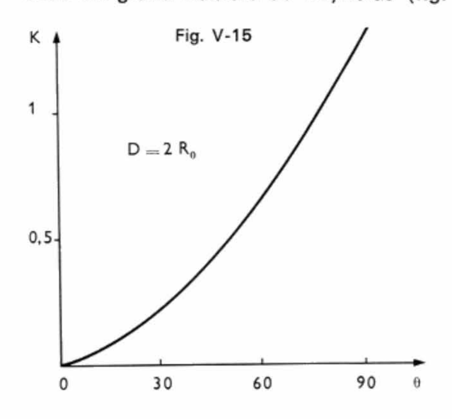


Fig. V-15

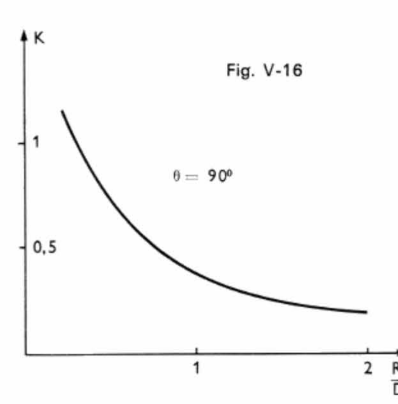
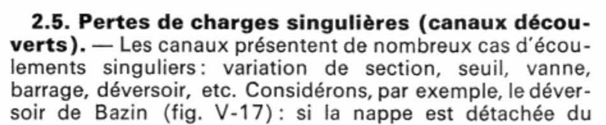


Fig. V-16



2.5. Pertes de charges singulières (canaux découverts).

— Les canaux présentent de nombreux cas d'écoulements singuliers : variation de section, seuil, vanne, barrage, déversoir, etc. Considérons, par exemple, le déversoir de Bazin (fig. V-17) : si la nappe est détachée du

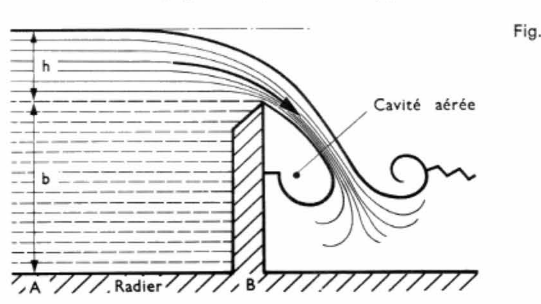


Fig. V-17

déversoir, elle est mince et stable et le théorème de Bernoulli peut être appliqué entre le plan du déversoir (B) et une zone (A) suffisamment éloignée à l'amont pour que la surface libre y soit horizontale ; il permet d'écrire :

$$q_v = m\, l\, h \sqrt{2\, g\, h} = K\, l \sqrt{h^3}$$

avec : h, cote du plan d'eau amont au-dessus de la crête du déversoir, l : largeur du déversoir, m : coefficient de débit (fonction de h et de b, hauteur du déversoir au-dessus du radier) en général compris entre 0,41 et 0,47.

Si le débit est important et si $h \ll b$, la formule approchée suivante est utilisée :

$$q_v = 1,84\, l \sqrt{h^3}$$

2.6. Autres types d'écoulements visqueux

1° *Écoulement entre deux plaques parallèles immobiles* (fig. V-18). — La première des équations de Navier (V. § 1.4) donne, en considérant les fuites latérales nulles et l'effet de viscosité prépondérant :

$$0 = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx} + \nu\, \Delta u$$

soit encore (avec $\rho\nu = \mu$ et $\Delta u = \frac{d^2u}{dy^2}$) :

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dx}$$

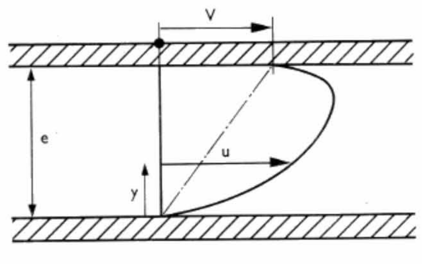


Fig. V-18

L'intégration par rapport à y donne, en faisant $u = 0$ pour $y = e$:

$$u = \frac{1}{2\mu}\left(-\frac{dp}{dx}\right)(e^2 - y^2) \quad \left(\text{avec} - \frac{dp}{dx} > 0\right)$$

Le débit par unité de largeur est alors égal à :

$$q_v = \left(-\frac{dp}{dx}\right)\frac{2e^3}{3\mu}$$

2° *Écoulement entre deux plaques parallèles, l'une fixe et l'autre animée de la vitesse V* (fig. V-19). — La vitesse u a pour valeur :

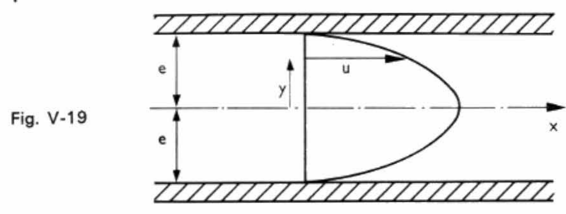


Fig. V-19

$$u = \frac{V}{e}y + \frac{1}{2\mu}\left(-\frac{dp}{dx}\right)(ey - y^2)$$

et le débit : $$q_v = \frac{V}{2}e + \left(-\frac{dp}{dx}\right)\frac{e^3}{12\mu}$$

3° *Théorie du coin d'huile.* — Appliquée au fonctionnement d'une butée articulée Mitchell (fig. V-20 a), elle permet d'établir la répartition des pressions le long du coin

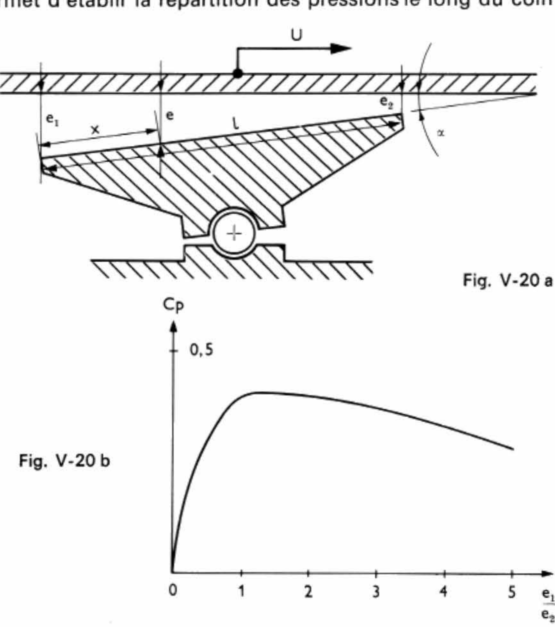


Fig. V-20 a

Fig. V-20 b

et de calculer la charge portante. Si le patin est peu incliné, de largeur unitaire, de longueur l, et si la plaque est animée de la vitesse U, entraînant ainsi l'huile par viscosité, le gradient de pression a pour valeur :

$$\frac{dp}{dx} = 6\,\mu\, U\left(\frac{1}{e^2} - \frac{2\,q_v}{e^3\,U}\right)$$

La charge portante totale est :

$$P = \frac{\mu\; U\; l^2\; C_p}{e_2^{\,2}}$$

C_p étant un coefficient de pression fonction du rapport des épaisseurs e_1 et e_2 du coin d'huile (fig. V-20b).

3. DYNAMIQUE DES FLUIDES APPLIQUÉE À UNE PLAQUE PLANE

La composante longitudinale R_x de la résultante des forces aérodynamiques appliquées à un corps plongé dans un fluide réel est la somme des trois traînées : la *traînée de forme*, ou *de sillage*, R_{xs}, la *traînée induite par la portance*, R_{xi}, et la *traînée de frottement*, R_{xf}. Dans la recherche des formes optimales pour les grandes vitesses, M affine le profil, et la traînée de frottement devient prépondérante. Bien qu'il soit impossible de déterminer complètement les forces de frottement sur un profil quelconque, on peut en donner des ordres de grandeurs satisfaisants grâce aux études effectuées sur la couche limite de la plaque plane.

3.1. Définition et caractéristiques d'une couche limite

1° *Épaisseur de la couche limite* δ. — C'est la distance du profil au point où, sur la normale en A à la paroi, la vitesse prend la valeur : $U = U_e = kU_0$, U_0 étant la vitesse loin du profil et k un coefficient pris arbitrairement égal à 0,99 (fig. V-21 a et b).

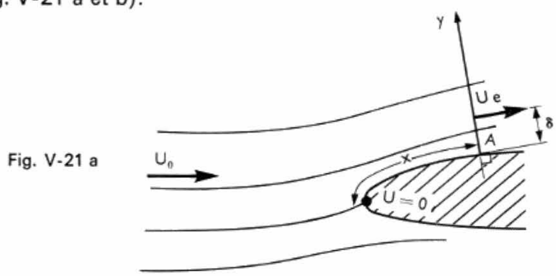


Fig. V-21 a

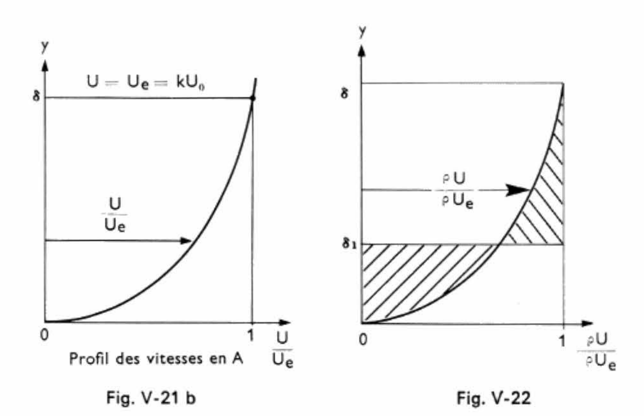


Fig. V-21 b

Fig. V-22

2° *Épaisseur de déplacement* δ_1. — C'est la quantité dont il faudrait déplacer la paroi, en chaque point d'abscisse x, pour avoir le même débit en masse dans un écoulement de fluide parfait (fig. V-22). Alors :

$$\int_0^\delta \rho\, U\, dy = \rho\, U_e\,(\delta - \delta_1)$$

ce qui donne :

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{U}{U_e}\right) dy$$

3° *Épaisseur de perte de quantité de mouvement* δ_2. Au travers de l'élément dy de la couche limite, le débit en masse $\rho\, U\, dy$ a une quantité de mouvement $\rho\, U^2\, dy$; dans l'écoulement de fluide parfait, ce même débit aurait une quantité de mouvement $\rho\, U . U_e\, dy$. La différence de ces deux quantités étendue à la couche limite représente la perte de quantité de mouvement :

$$\int_0^\delta \rho\, U\,(U_e - U)\, dy$$

La paroi peut être déplacée d'une quantité δ_2 telle que :

$$\rho\, U_e^2\, \delta_2 = \int_0^\delta \rho\, U\,(U_e - U)\, dy$$

d'où : $$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{U}{U_e}\left(1 - \frac{U}{U_e}\right) dy$$

4° *Profil des vitesses.* — La courbe de répartition des vitesses dans l'épaisseur de la couche limite : $\frac{U}{U_e} = f\left(\frac{y}{\delta}\right)$ est caractéristique du type d'écoulement. Les courbes (L) d'une

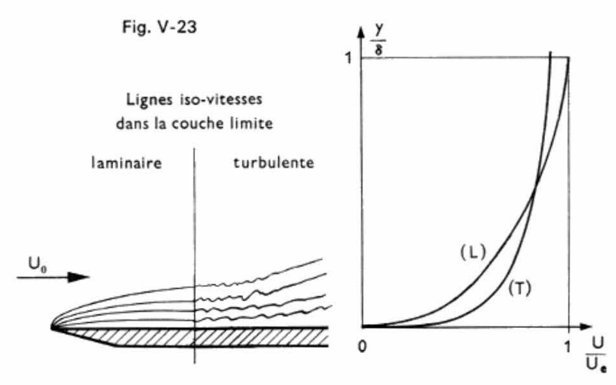


Fig. V-23

couche limite laminaire et (*T*) d'une couche limite turbulente sont représentées figure V-23.

5° *Force de frottement à la paroi.* — Sur l'élément d'aire dS, elle a pour valeur :

$$dF_p = \tau_p \, dS = -\mu \frac{dU}{dy} \, dS \text{ (V. § 1.1).}$$

En appliquant le théorème de la quantité de mouvement à un volume élémentaire, on montre que :

$$|dF_p| = \rho \, U_e^2 \left|\frac{d\delta_2}{dx}\right| dS$$

6° *Coefficient de frottement local C_f.* — Par définition :

$$C_f = \frac{1}{\frac{\rho \, U_e^2}{2}} \cdot \frac{|dF_p|}{dS}$$

Alors : $$C_f = 2 \left|\frac{d\,\delta_2}{dx}\right|$$

7° *Coefficient de frottement moyen.* — Il permet de calculer l'effort de frottement sur un élément. C'est la valeur moyenne, sur une longueur $l = x_2 - x_1$ du coefficient de frottement local :

$$C_F = \frac{1}{l} \int_{x_1}^{x_2} C_f \, dx$$

8° *Nombre de Reynolds.* — Lié à la position du point étudié d'abscisse x il est défini par : $\mathcal{R}_x = \frac{U_e x}{\nu}$, et il joue un rôle aussi important dans l'étude des écoulements sur la plaque plane que dans celle des écoulements dans les tuyauteries (où il était défini par rapport au diamètre).

3.2. Couche limite laminaire pour $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$. —

En écoulement plan, permanent et incompressible, une solution mathématique exacte aux équations de la couche limite laminaire sur la plaque plane parallèle à $\vec{U_0}$ à l'infini a été obtenue par Blasius, dans l'hypothèse d'un gradient longitudinal de pression nul.

Cette étude fait intervenir la fonction « profil des vitesses » : $\frac{U}{U_e} = f(\alpha)$, α étant une fonction à déterminer de x, y et $\mathcal{R}_x$. Blasius a montré que dans les hypothèses ci-dessus la fonction f satisfaisait à l'équation différentielle du troisième ordre :

$$2f''' + f.f'' = 0$$

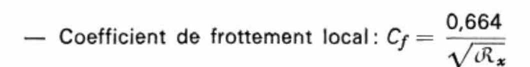
avec : $\alpha = \frac{y}{x}\sqrt{\mathcal{R}_x}$, f''' dérivée d'ordre 3 de f et f'' dérivée seconde de f.

1° *Résultats pratiques.* — Le profil des vitesses est donné par la figure V-24.

— Épaisseur de la couche limite : $\delta = \frac{4{,}92\,x}{\sqrt{\mathcal{R}_x}}$

— Épaisseur de déplacement : $\delta_1 = \frac{1{,}72\,x}{\sqrt{\mathcal{R}_x}}$

— Épaisseur de perte de quantité de mouvement :
$\delta_2 = \frac{0{,}664\,x}{\sqrt{\mathcal{R}_x}}$


— Coefficient de frottement local : $C_f = \frac{0{,}664}{\sqrt{\mathcal{R}_x}}$

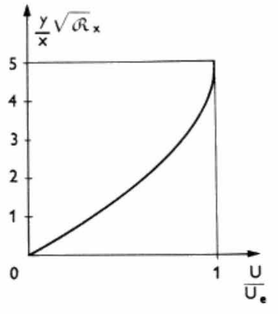


Fig. V-24

3.3. Couche limite laminaire pour $\frac{\partial p}{\partial x} \neq 0$. —

Un gradient de pression longitudinal non nul apparaît si le vecteur vitesse ne reste pas équipollent à lui-même, c'est-à-dire si le profil des vitesses dépend de x et change de x_1 à x_2 ; ainsi, lorsque le gradient de pression longitudinal devient positif, la couche limite risque de décoller de la paroi : le profil des vitesses correspondant est caractéristique (fig. V-25).

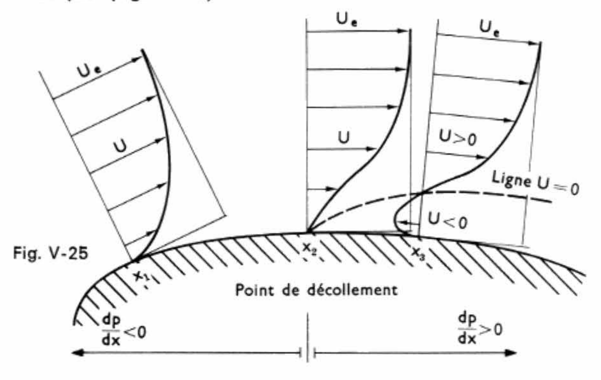
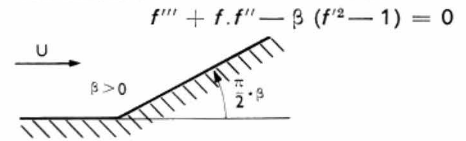


Fig. V-25

L'approche mathématique de l'écoulement dans ce type de couche limite se fait en étudiant un écoulement à potentiel de vitesse dévié d'un angle $\frac{\pi}{2}\beta$ (β est un coefficient positif ou négatif) par un dièdre (fig. V-26). L'équation différentielle de Blasius devient :

$$f''' + f.f'' - \beta\,(f'^2 - 1) = 0$$



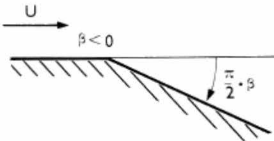


Fig. V-26

Polhausen et Hartrée ont contribué à l'obtention des résultats de cette étude :

— il existe un profil unique de vitesse pour chaque valeur de β,

— les épaisseurs de déplacement de la couche limite δ_1 et δ_2 ne dépendent que de β,

— le coefficient de frottement est le produit d'une constante (différente pour chaque valeur de β) par le nombre de Reynolds $\mathcal{R}_x$,

— *pratiquement*, le relevé des pressions le long d'une surface courbe permet de prévoir les évolutions de la couche limite et du coefficient de frottement à partir d'un schéma d'écoulement aussi simplifié que celui qui est étudié autour d'un dièdre.

3.4. Couche limite turbulente. — On n'a pas encore trouvé de solution mathématique exacte pour l'écoulement dans la couche limite turbulente. Cependant, des lois semi-empiriques ont pu être établies : lois *en puissance* et lois *logarithmiques.*

1° *Lois en puissance.* — Elles sont de la forme : $\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}$. Ses travaux sur les écoulements dans les tuyauteries ont conduit Blasius à choisir $n = 5$. Les résultats se résument ainsi :

$$\delta = \frac{0{,}38\,x}{(\mathcal{R}_x)^{1/5}}\ ;\quad \delta_1 = \frac{0{,}0475\,x}{(\mathcal{R}_x)^{1/5}}\ ;\quad C_f = \frac{0{,}0592}{(\mathcal{R}_x)^{1/5}}$$

et correspondent à l'expérimentation jusqu'à $\mathcal{R}_x = 5.10^6$.

R. Michel, en France, a proposé : $n = 6$, qui permet de s'approcher davantage des résultats expérimentaux jusqu'à $\mathcal{R}_x = 5.10^8$ (fig. V-27) et qui donne :

$$C_f = \frac{0{,}0368}{(\mathcal{R}_x)^{1/6}}$$

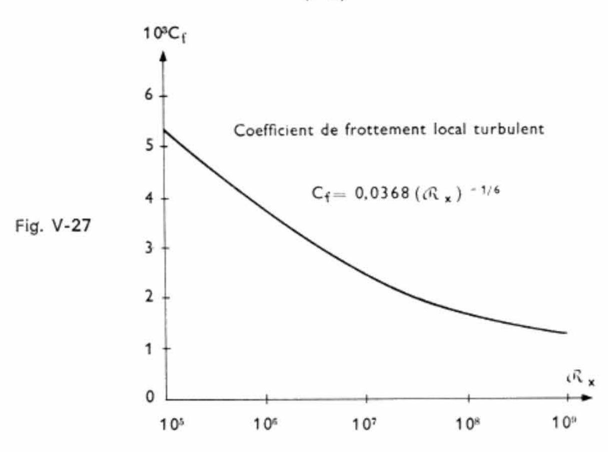


Fig. V-27

L'adoption de loi en puissance est soumise à deux critiques : d'une part, le profil des vitesses obtenu est fonction du nombre de Reynolds ; d'autre part, le profil réel des vitesses au voisinage de la paroi (dans le film laminaire : fig. V-28) ne suit pas une loi en puissance.

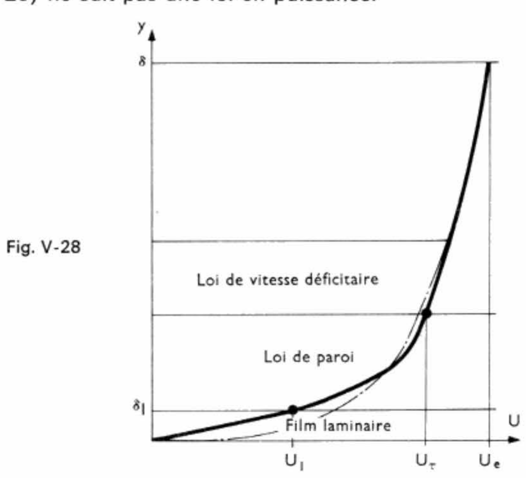


Fig. V-28

2° *Lois logarithmiques.* — Elles remédient à ces derniers inconvénients.

Dans le film laminaire on prend : $\frac{U}{U_l} = \frac{y}{\delta_l}$

Au-delà, la loi de paroi (fig. V-29) s'écrit :

$$\frac{U}{U_\tau} = C_1 + A \log_e \frac{U_\tau . y}{\nu}$$

avec U_τ = vitesse de frottement définie par $\tau_p = \rho U_\tau^2$; cette vitesse étant supérieure à celle donnée par la loi en puissance, pour satisfaire à l'équation de continuité, une distribution de vitesses représentée par une *loi de vitesse*

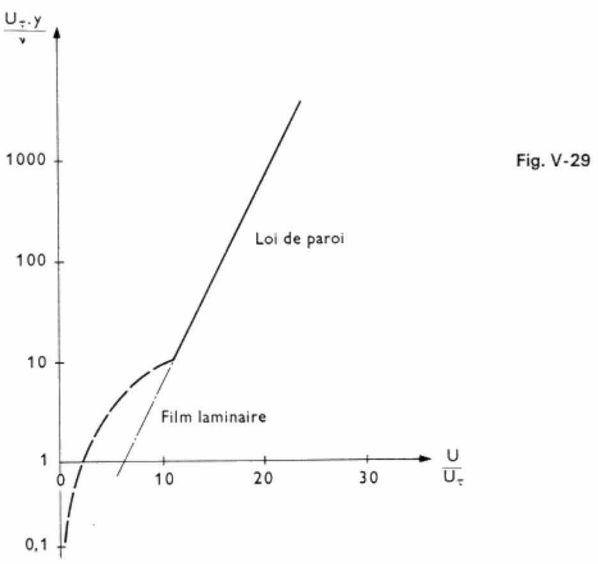


Fig. V-29

déficitaire raccorde $\frac{U}{U_\tau}$ à $\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/n}$. Cette loi de vitesse déficitaire s'écrit :

$$\frac{U_e - U}{U_\tau} = C_2 - A \log_e \frac{y}{\delta}$$

Parmi les travaux de Nikuradse, Rotta, Clauser, Coles, Karman, Squire et Young, nous retiendrons les formules de Karman pour la loi de paroi :

$$\frac{U}{U_\tau} = 5{,}97 + 5{,}87 \log_e \frac{U_\tau y}{\nu}$$

et pour le coefficient de frottement :

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = 4{,}15 \lg (\mathcal{R}_x C_f) + 1{,}7$$

3.5. Effets de la compressibilité. — Trois effets apparaissent dans la couche limite en fluide compressible : le ralentissement de la vitesse au voisinage de la paroi, en diminuant la masse volumique, provoque une augmentation de l'épaisseur de déplacement δ_1 et une diminution du coefficient de frottement C_f ; les échanges thermiques entre les différents filets deviennent importants et il est nécessaire de définir la couche limite thermique.

1° *Couche limite thermique.* — Il a fallu l'étudier de manière précise pour les vols supersoniques. Soit T et T_e les températures dans la couche limite et hors de celle-ci, T_i et T_{ie} les températures d'arrêt définies par : $T_i = T + \frac{U^2}{2\,C_p}$, et : $T_{ie} = T_e + \frac{U_e^2}{2\,C_p}$, C_p étant la chaleur massique à pression constante. La température de frottement T_f est la température d'équilibre que prendrait la paroi si elle était isolante et non rayonnante, c'est-à-dire athermane : en général, la température réelle de paroi est $T_p < T_f$. La figure V-30 montre l'évolution de T dans la couche limite et l'influence sur cette évolution des valeurs

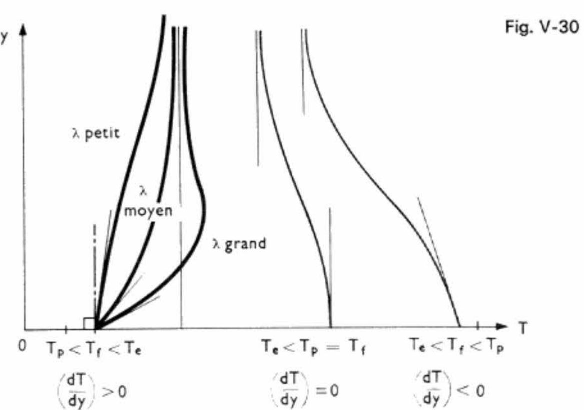
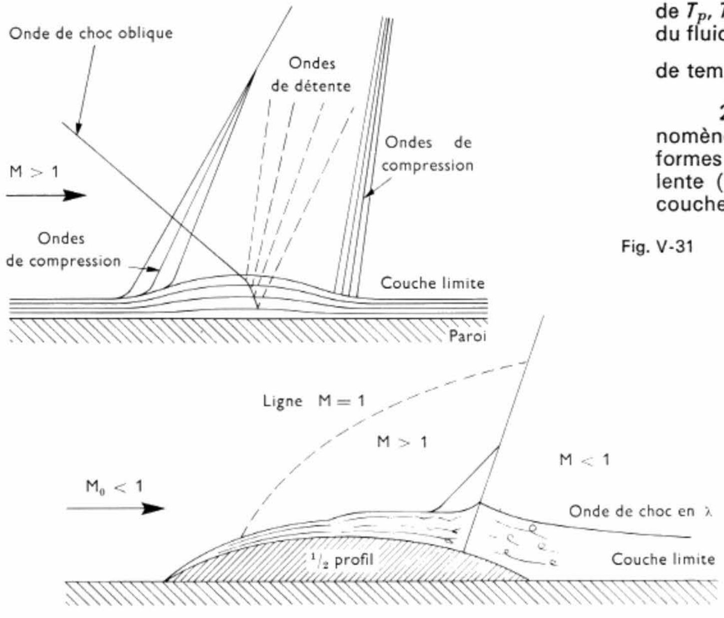


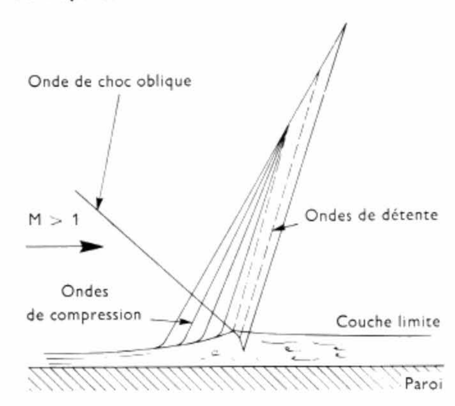
Fig. V-30



de T_p, T_e et λ, λ étant le coefficient de conduction thermique du fluide. On remarque le changement de signe du gradient de température $\frac{dT}{dy}$ au contact de la paroi.

2° *Interaction couche limite-onde de choc.* — Phénomène fréquemment rencontré, il se manifeste sous deux formes suivant que la couche limite est laminaire ou turbulente (fig. V-31) et il peut entraîner le décollement de la couche limite, ou l'épaississement de celle-ci.

Fig. V-31



CHAPITRE VI

DYNAMIQUE DES FLUIDES EN ÉCOULEMENT NON PERMANENT

1. GÉNÉRALITÉS

L'étude des écoulements non permanents englobe les écoulements turbulents et graduellement variés, ainsi que les écoulements avec propagation d'ondes élastiques (acoustiques, de choc et de détonation) dont font partie les coups de bélier hydraulique et les phénomènes de pompage.

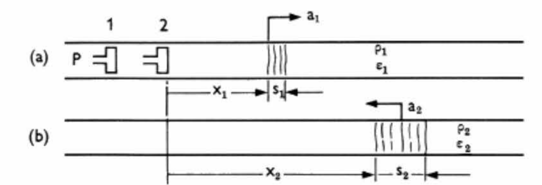
Les ondes de choc et de détente déjà étudiées (V. chap. 4, § 4 et 5) sont, nous l'avons vu, des ondes stationnaires. Les ondes élastiques dites progressives se déplacent et transmettent un mouvement dont la vitesse est parallèle ou normale à leur sens de propagation : elles sont appelées longitudinales dans le premier cas et transversales dans le second.

L'onde plane se propage dans une direction unique et à un instant quelconque ses propriétés sont les mêmes en tout point d'un même plan, dit *plan d'onde*.

2. ONDE PROGRESSIVE ET ONDE DE CHOC

2.1. Célérité d'une onde élastique. — La propagation d'une onde élastique s'effectue avec une certaine vitesse, dite vitesse de propagation ou célérité. Cette célérité, *u*, est fonction de la masse volumique ρ et du coefficient d'élasticité ε du milieu fluide. En désignant par *s* l'élongation du mouvement d'une particule du fluide

Fig. VI-1 Propagation d'un ébranlement dans une canalisation provenant du déplacement d'un piston P de 1 en 2.



a) Onde élémentaire de compression au temps t_1
b) Onde élémentaire de détente au temps $t_2 > t_1$ (après réflexion)

(fig. VI-1), au point d'abscisse *x* et à l'instant *t*, l'application des théorèmes de la mécanique conduit en effet à l'équation différentielle :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \frac{\varepsilon}{\rho} \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}$$

qui, en posant :

$$a = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}$$

est l'équation de propagation :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}$$

On démontre que toute expression de la forme :

$$s = f(x - at) + g(x + at)$$

dans laquelle *f* et *g* sont des fonctions quelconques mais déterminées par les conditions initiales et les conditions aux limites, satisfait à l'équation de propagation.

Le coefficient de compressibilité χ, inverse du coefficient d'élasticité ε, est fonction de la pression du gaz ; de plus, il dépend du processus de transformation correspondant à la variation de pression transmise par l'onde, suivant qu'elle est isotherme ou adiabatique réversible. Dans le premier cas, qui correspond à la propagation d'une onde caractérisée par une très faible vitesse de variation de pression, il vient :

$$\chi = -\frac{1}{p} \qquad \text{et : } a = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$$

Dans le second cas, la pression varie rapidement et si la variation de pression transmise est petite, on montre que, en désignant par γ le rapport des chaleurs massiques à pression et à volume constant :

$$\chi = -\frac{1}{\gamma p} \qquad \text{et : } a = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\gamma r T}$$

L'onde est alors une onde acoustique dont la célérité est celle du son (V. chap. 4 § 4.1). Si la variation de pression est grande, comme dans le cas d'une onde de choc, la propagation s'effectue à une vitesse *c* plus grande que

celle du son a_1 et qui est fonction du rapport $\frac{p_2}{p_1}$ des pressions de part et d'autre de l'onde :

$$\frac{c}{a_1} = M_1 = \sqrt{1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma}\left(\frac{p_2}{p_1} - 1\right)}$$

M_1 représentant le nombre de Mach en amont de l'onde. Les vitesses de l'écoulement u_1 et u_2 en amont et en aval de l'onde sont telles que :

$$\left[\frac{u_2 - u_1}{a_1}\right] = \frac{2}{\gamma + 1}\left(M_1 - \frac{1}{M_1}\right)$$

Ces fonctions permettent de tracer des diagrammes dits *polaires de choc* (fig. VI-2).

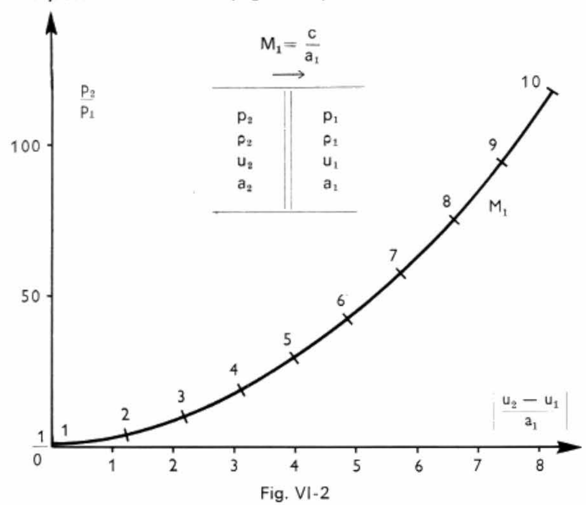


Fig. VI-2

Pour l'acier, l'eau et l'air, le tableau ci-après donne, dans les conditions standard de température et de pression, le coefficient d'élasticité, la masse volumique et la vitesse de propagation a_0 d'une onde acoustique dans les conditions normales.

	Acier	Eau	Air
ε en newtons par mètre carré	$2{,}1 . 10^{11}$	$2 . 10^9$	$1{,}4 . 10^4$
ρ en kilogrammes par mètre cube	$7{,}8 . 10^3$	$1 . 10^3$	$1{,}25 . 10^{-1}$
a_0 en mètres par seconde	5 200	1 410	334

2.2. Formation et propagation d'une onde. — Elles s'illustrent à l'aide du déplacement d'un piston dans une tuyauterie cylindrique rectiligne de longueur suffisamment grande pour ne pas prendre en compte les effets d'extrémité. Chaque déplacement élémentaire du piston engendre le départ de deux ondes élémentaires de pression : l'une, issue de la face amont du piston et se déplaçant dans le même sens que lui (fig. VI-3) ; l'autre, issue de la face aval du piston et s'étendant à tout le domaine en aval du piston (fig. VI-4).

1° *Onde de surpression.* — De faible amplitude et émise à l'instant t_i, elle se propage, *par rapport à la tuyauterie*, à la vitesse a_i telle que : $a_i = a_{i-1} + \frac{\gamma + 1}{2} dV_i$, avec : a_i célérité locale du son et dV_i variation de la vitesse de déplacement du piston. Les relations isentropiques déjà évoquées servent à définir les pressions, températures et masses volumiques correspondantes. Au cours du temps, chaque onde élémentaire qui part du piston en mouvement, va à une vitesse supérieure à la précédente, car une surpression s'accompagne toujours d'une augmentation de température et la vitesse de l'onde croît avec la température : les ondes élémentaires successives ont donc tendance à se rattraper. Lorsque ce phénomène se produit, elles se superposent : il y a focalisation et génération d'une onde de choc en milieu gazeux, d'un déferlement et d'une onde de ressaut en hydraulique.

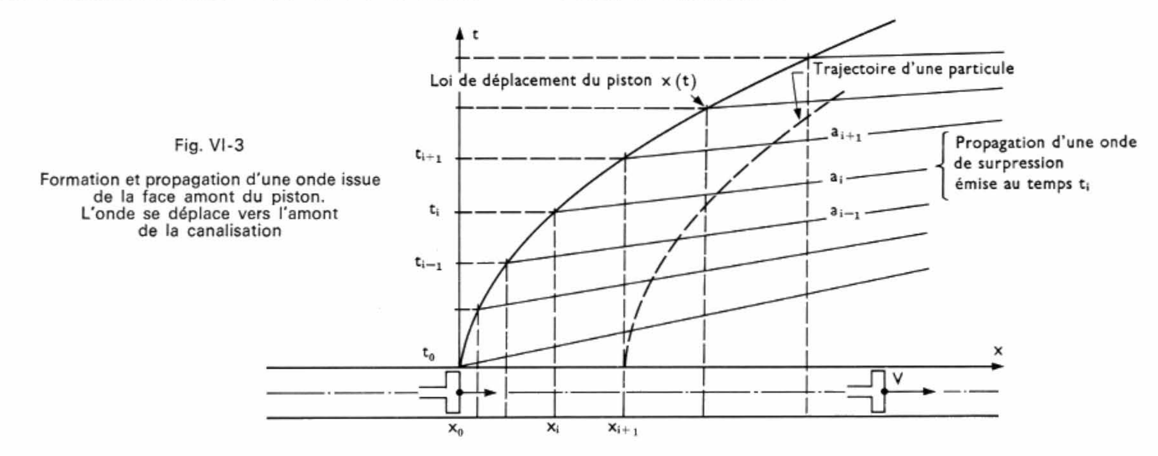


Fig. VI-3

Formation et propagation d'une onde issue de la face amont du piston. L'onde se déplace vers l'amont de la canalisation

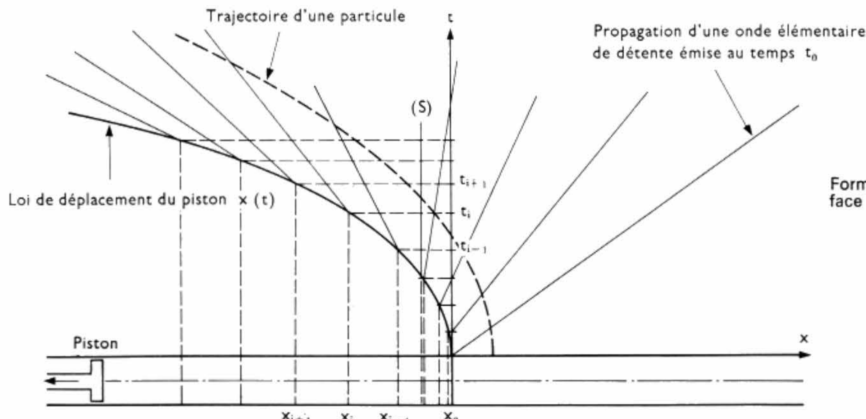
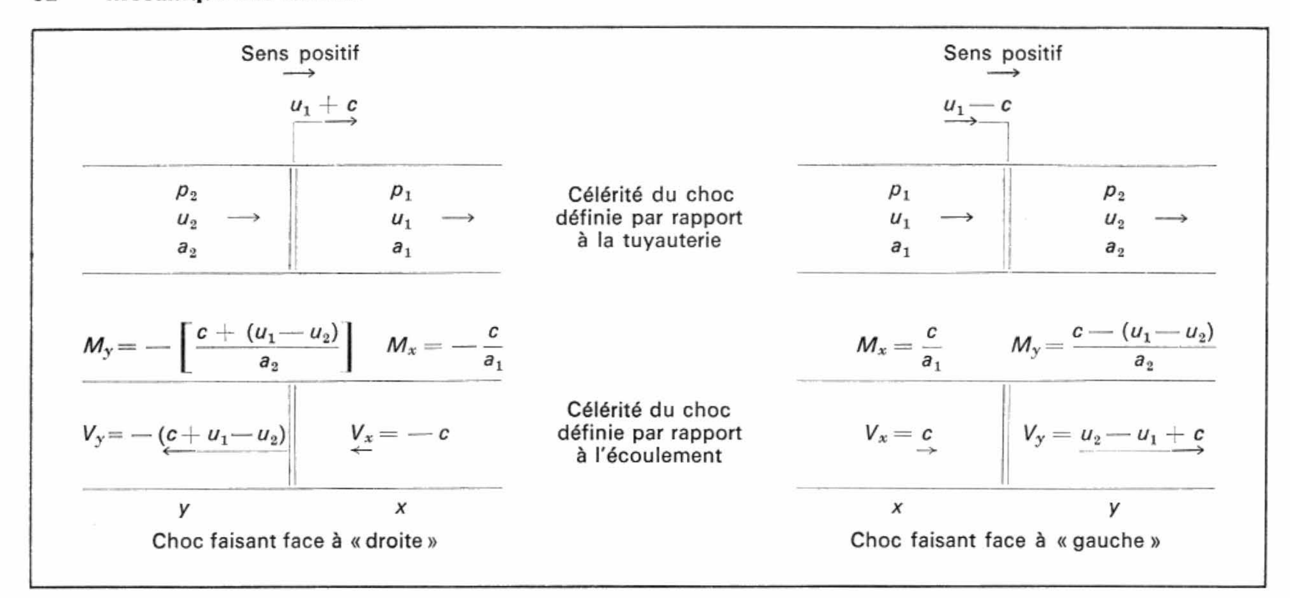


Fig. VI-4

Formation et propagation d'une onde issue de la face aval du piston. L'onde se déplace vers l'aval de la canalisation



2° *Onde de détente.* — Elle s'étudie de la même façon que l'onde de surpression, mais les vitesses V et u étant de signe contraire, la vitesse $a_i = a_{i-1} - \frac{\gamma + 1}{2} dV_i$ des ondes élémentaires successives diminue dans le temps. Les perturbations vont de moins en moins vite et il existe une onde stationnaire (indépendante du temps), telle que (S).

2.3. Onde de choc. — L'étude de l'onde de choc non stationnaire se ramène à l'étude du choc droit stationnaire en effectuant un changement de repère : les équations de continuité, d'impulsion et d'énergie sont écrites pour une surface de contrôle entourant uniquement le choc et les relations déjà explicitées en écoulement permanent sont alors vraies de part et d'autre du choc (V. tableau ci-dessus).

3. APPLICATIONS

3.1. Vidange d'une chambre. — Le dispositif expérimental (fig. VI-5-a) comporte une tuyauterie cylindrique rectiligne fermée équipée de deux capteurs de pression. L'une des extrémités est constituée par une membrane qui se rompt quand la pression interne est suffisante, provoquant ainsi un écoulement brutal vers l'extérieur et le départ d'un train d'ondes de détente vers l'intérieur. La courbe de la pression, en fonction du temps, est donnée, pour les deux points où sont les capteurs, par la figure VI-5 b. Les trajectoires des particules, qui peuvent être visualisées, montrent bien le phénomène oscillatoire de cet écoulement. Aux extrémités, si les ondes se réfléchissent sur une paroi matérielle, l'onde incidente et l'onde réfléchie sont de même nature (compression et compression ou détente et détente) ; s'il s'agit d'une paroi isobare, une onde de compression engendre une onde de détente et une onde de détente engendre une onde de compression.

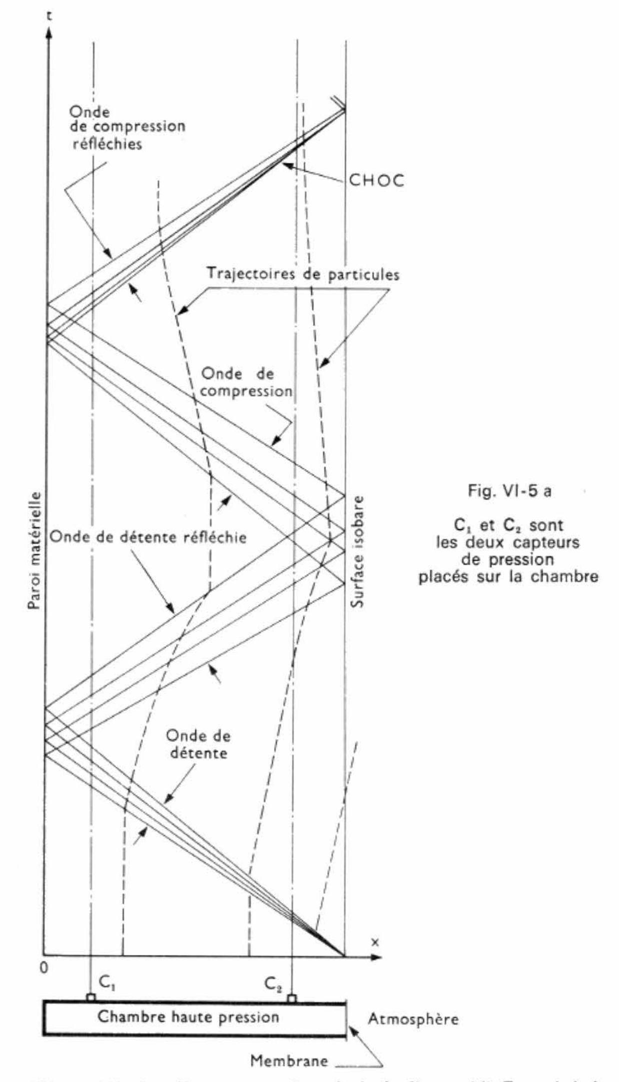


Fig. VI-5 a

C_1 et C_2 sont les deux capteurs de pression placés sur la chambre

3.2. Tube à choc à section constante

1° *Fonctionnement.* — Le tube à choc est un tube comportant deux chambres séparées par un diaphragme et contenant respectivement des gaz à haute et basse pression (fig. VI-6). À la rupture de ce diaphragme, le choc se déplace vers la droite dans le milieu (1) et une onde de détente se propage vers la gauche dans le milieu (3). L'état (2) à l'arrière du choc et l'état (4) en arrière de l'onde de détente ont les propriétés suivantes : leurs pressions s'équilibrent ($p_2 = p_4$), mais leurs températures T_2 et T_4 sont différentes. En effet, la détente de (3) en (4) s'effectue isentropiquement alors que la compression par choc de (1) en (2) ne peut être qu'adiabatique. Il en résulte une surface de discontinuité de température séparant les milieux (2) et (4). Le diagramme (p, u) de la figure VI-7 traduit le fonctionnement du tube à choc. Le diagramme de position (fig. VI-6) montre que le choc réfléchi interfère au point F avec l'onde de séparation : en ce point, il est possible de discerner une onde de choc réfléchie [limite des milieux (5) et (6)], une onde de choc transmise [limite des

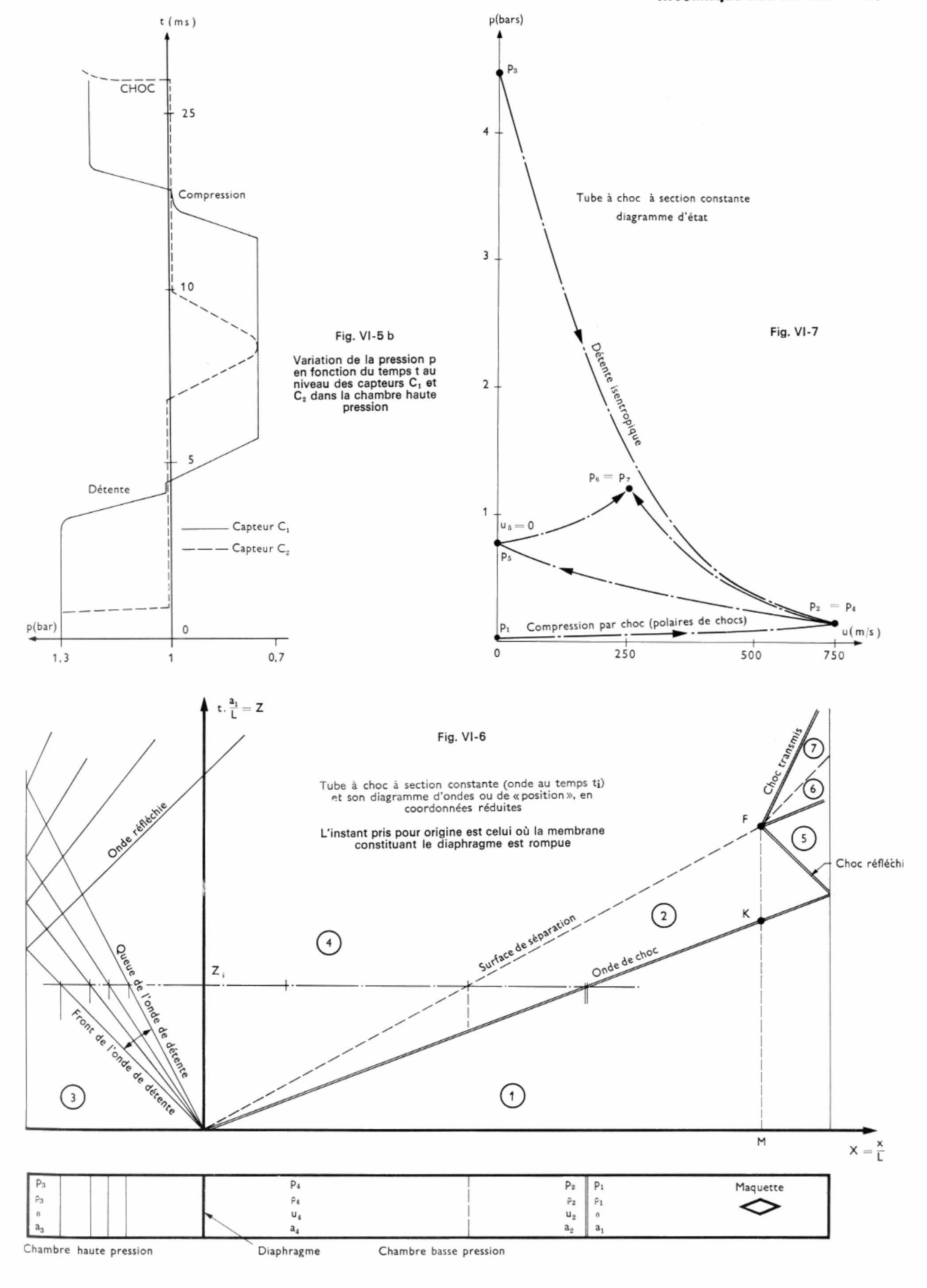


Fig. VI-5 b

Variation de la pression p en fonction du temps t au niveau des capteurs C_1 et C_2 dans la chambre haute pression

Fig. VI-7

Fig. VI-6

milieux (4) et (7)] et une altération de la célérité de la surface de séparation [limite des milieux (6) et (7)].

2° *Utilisations.* — Le tube à choc peut être utilisé comme soufflerie supersonique. Le temps maximal de travail en écoulement sain (u_2, p_2 et a_2 connus et constants) est représenté (V. fig. VI-6) par le segment KF : la maquette doit donc être placée en M.

Le tube à choc peut aussi servir à l'étude expérimentale des ondes, de leurs interactions, de leur réfraction ou de leur diffraction.

3.3. Autres tubes à chocs. — Cette technique est actuellement très développée et il faut signaler :

1° *Les tubes à chocs à plusieurs chambres,* qui sont destinés à avoir des chocs plus intenses et à pouvoir ainsi amorcer des tuyères divergentes (fig. VI-8).

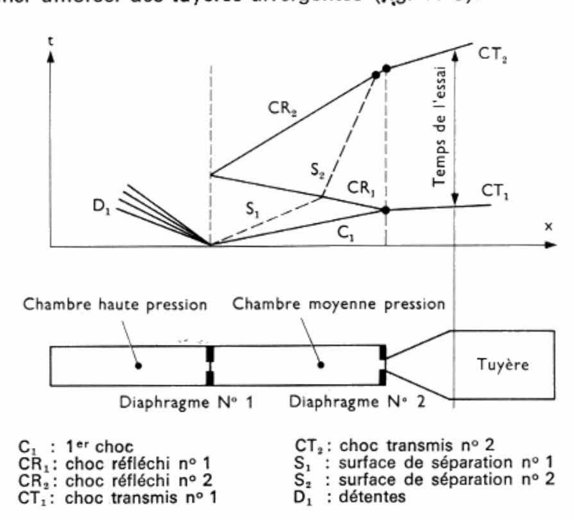
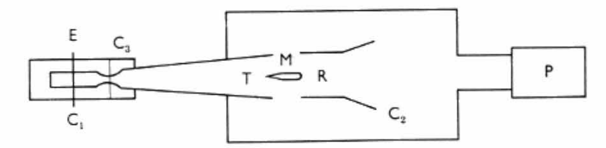


Fig. VI-8

2° *Les souffleries à arcs* qui sont des tubes à chocs dont le fluide situé dans la chambre haute pression est porté à très haute température par l'éclatement d'un arc électrique (fig. VI-9).



C_1 : Chambre à arc 6 000 K - 2 000 bars
E : Électrodes 10 000 volts
T : Tuyère
C_3 : Col muni d'un bouchon
R : Récupérateurs cylindriques
C_2 : Capacité (pression : 10 μm de mercure)
P : Batteries de pompes
M : Maquette

Fig. VI-9

3° *Les tubes à chocs de combustion,* dont le fluide de la chambre haute pression est un mélange hydrocarburé, de composition stœchiométrique, destiné à l'étude de la combustion en régime instationnaire.

4° *Les pulsoréacteurs,* qui sont des appareils de combustion instationnaire dont les formes ont été dessinées pour obtenir une poussée assurant la propulsion d'engins terrestres ou aériens (fig. VI-10).

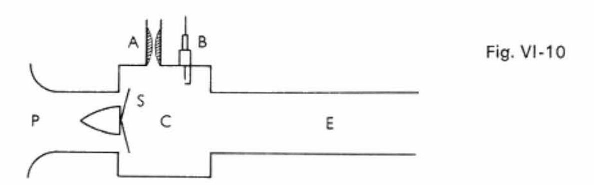


Fig. VI-10

S : Soupapes d'entrée d'air
C : Chambre de combustion
B : Bougie électrique
A : Arrivée de carburant
E : Tube d'échappement
P : Prise d'air frais

3.4. Le coup de bélier hydraulique. — La manœuvre brutale d'une vanne (ou d'un robinet) située à l'extrémité d'une canalisation hydraulique est à l'origine d'une onde qui remonte le sens de l'écoulement initial : à l'ouverture correspond une onde de détente, et à la fermeture une onde de surpression.

Soit, par exemple, un tuyau horizontal (fig. VI-11) de section S, de longueur l, dans lequel un liquide circule à la vitesse V_m. On ferme la vanne en un temps Δt. Le tuyau

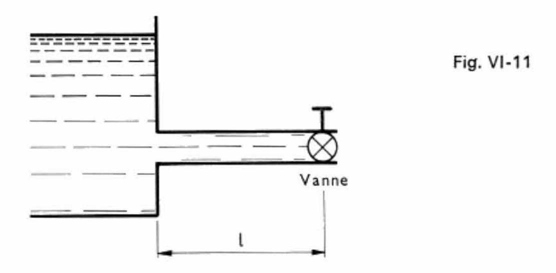


Fig. VI-11

étant supposé alimenté par un réservoir à niveau constant, la surpression produite par le coup de bélier à l'extrémité de la conduite est en première approximation :

$$\Delta p = \frac{\rho l V_m}{\Delta t}$$

Si un clapet (ou une soupape) incorporé dans un circuit hydraulique est le siège d'une fuite due à des jeux mécaniques, après le passage d'une première perturbation, le système mécanique peut se mettre en oscillations auto-entretenues. Ce phénomène est à l'origine d'un accroissement considérable de la pression qui peut être dangereux pour la tenue mécanique d'une installation ordinaire, mais qui est parfois utilisé dans certains surpresseurs conçus spécialement pour alimenter en eau des points élevés.

CHAPITRE VII

AÉRODYNAMIQUE

1. GÉNÉRALITÉS

L'aérodynamique est l'étude des phénomènes qui apparaissent lorsqu'un solide est en mouvement par rapport à un gaz, l'air en général. Le solide peut se déplacer dans le fluide immobile (avion en vol), ou peut être fixe dans le fluide en mouvement (superstructure exposée au vent, maquette d'avion en soufflerie). Nous prendrons un trièdre orthonormé *lié au solide,* et nous désignerons par $\vec{V_0}$ la vitesse de translation à l'infini du fluide.

1.1. Trainée aérodynamique. — L'ensemble des forces exercées par le fluide sur le corps constitue un torseur, de résultante $\vec{R}$ et de moment (par rapport à un point) $\vec{M}$. Soit R_x la mesure algébrique de la projection de

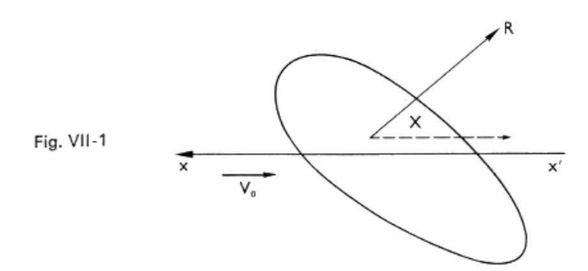


Fig. VII-1

$\vec{R}$ sur un axe $x'x$ lié au solide, parallèle à $\vec{V_0}$ et de sens contraire à ce vecteur (fig. VII-1). R_x est la *traînée aérodynamique*. Elle est évidemment négative.

1° *Coefficient de traînée.* — On pose :

$$R_x = -\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S C_x$$

C_x est un coefficient sans dimension, appelé *coefficient de traînée*. S est l'aire d'une surface choisie arbitrairement, appelée *surface de référence*, et qui est précisée dans chaque cas. Le coefficient de traînée est lui-même la somme de trois autres coefficients :

$$C_x = C_{xf} + C_{xn} + C_{xi}$$

— C_{xf} est le coefficient de traînée de frottement ;
— C_{xn} est le coefficient de traînée de forme ;
— C_{xi} est le coefficient de traînée induite.

On utilise aussi deux autres coefficients :

$$C_{xp} = C_{xf} + C_{xn}$$

et :

$$C_{xh} = C_{xn} + C_{xi}$$

— C_{xp} est le coefficient de traînée de profil ;
— C_{xh} est le coefficient de traînée de pression.

2° *Coefficient de pression local.* — C'est le coefficient K_p défini au chapitre 3, paragraphe 3.2 :

$$K_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2}$$

(ρ_0 : masse volumique du fluide à l'infini en amont).

1.2. Règles de similitude. — Les projets de machines nouvelles, qui ne peuvent s'appuyer sur des résultats déjà acquis, nécessitent des essais sur *modèles réduits* ou *maquettes* qui sont des corps géométriquement semblables aux corps réels. Mais ces essais ne peuvent être entrepris qu'à la condition de connaître les *lois de similitude* qui permettront de calculer les caractéristiques de la machine réelle à partir de celles de la maquette. Le théorème de Rayleigh régit les conditions de similitude et fait apparaître des « nombres » qui doivent être les mêmes pour deux écoulements semblables. Parmi ceux-ci, citons :

Nombre de Reynolds (fluides non pesants, incompressibles et visqueux) :

$$\mathcal{R} = \frac{V.L}{\nu}$$

Nombre de Froude (fluides pesants, incompressibles et non visqueux) :

$$\mathcal{F} = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

Nombre de Prandtl (transmission de chaleur dans les fluides) :

$$\mathcal{P} = \frac{\mu\, c_p}{\lambda}$$

Nombre de Mach :

$$M = \frac{V}{a}$$

2. AÉRODYNAMIQUE DES CORPS ET DES PROFILS

2.1. Aérodynamique des corps géométriquement simples

1° *Plaque plane normale au vent* (fig. VII-2). — Pour $\mathcal{R} > 10^3$, le coefficient de traînée de pression, rapporté au maître-couple, est $C_{xh} = 1{,}12$ pour un disque ; le coefficient K_p vaut 0,83 sur la face amont et — 0,29 sur la face aval.

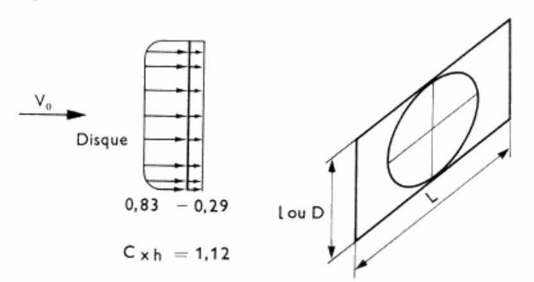
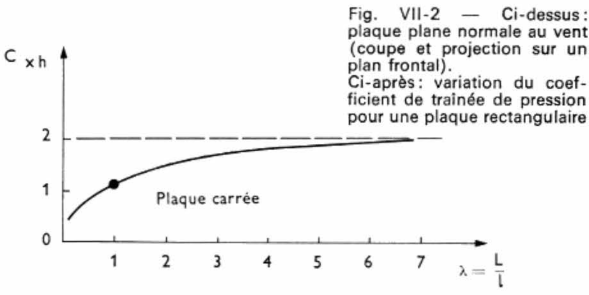


Fig. VII-2 — Ci-dessus : plaque plane normale au vent (coupe et projection sur un plan frontal).
Ci-après : variation du coefficient de traînée de pression pour une plaque rectangulaire



La plaque plane rectangulaire a un C_{xh} fonction du rapport de ses dimensions géométriques, et qui varie de 1,16 (plaque carrée) à 1,95 (plaque très longue par rapport à la largeur).

2° *Corps fuselé de révolution* (fig. VII-3). — La valeur minimale de C_{xh} rapportée au maître-couple est voisine de 0,03 et, comme le coefficient C_{xf} peut atteindre 0,07, le coefficient de traînée C_x minimal est environ égal à 0,1.

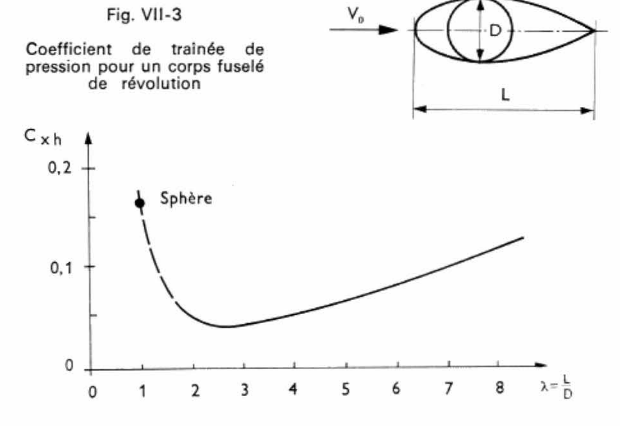


Fig. VII-3

Coefficient de traînée de pression pour un corps fuselé de révolution

3° *Cylindre de longueur infinie* (V. fig. VII-4 a et b). — Les observations effectuées en soufflerie ou en tunnel aérodynamique ont montré que l'aspect de l'écoulement varie en fonction du nombre de Reynolds $\mathcal{R} = \frac{VD}{\nu}$, D étant le diamètre du cylindre. Pour $\mathcal{R} < 2500$, on distingue d'abord l'écoulement du type visqueux, parfaitement laminaire, puis l'écoulement avec sillage en cœur et tourbillons symétriques, enfin l'écoulement avec tourbillons alternés. Pour $\mathcal{R} > 2500$, il s'établit un large sillage tourbillonnaire avec un point de décollement, dont la position dépend de $\mathcal{R}$. Lorsque $\mathcal{R} = \mathcal{R}_c$, la couche limite devient turbulente : le point de décollement est retardé et ne se trouve qu'à

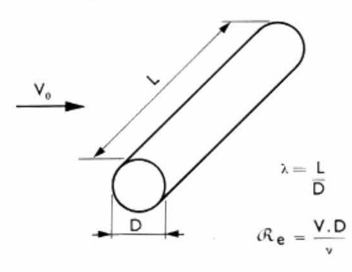
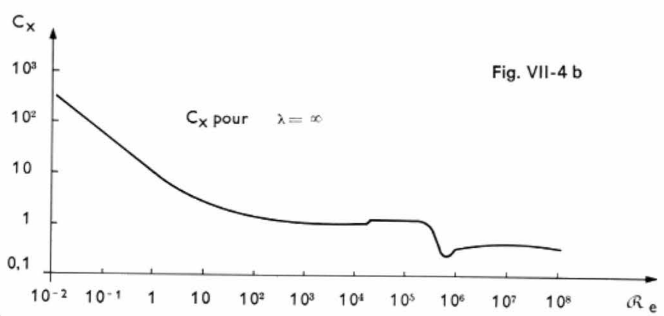


Fig. VII-4 a



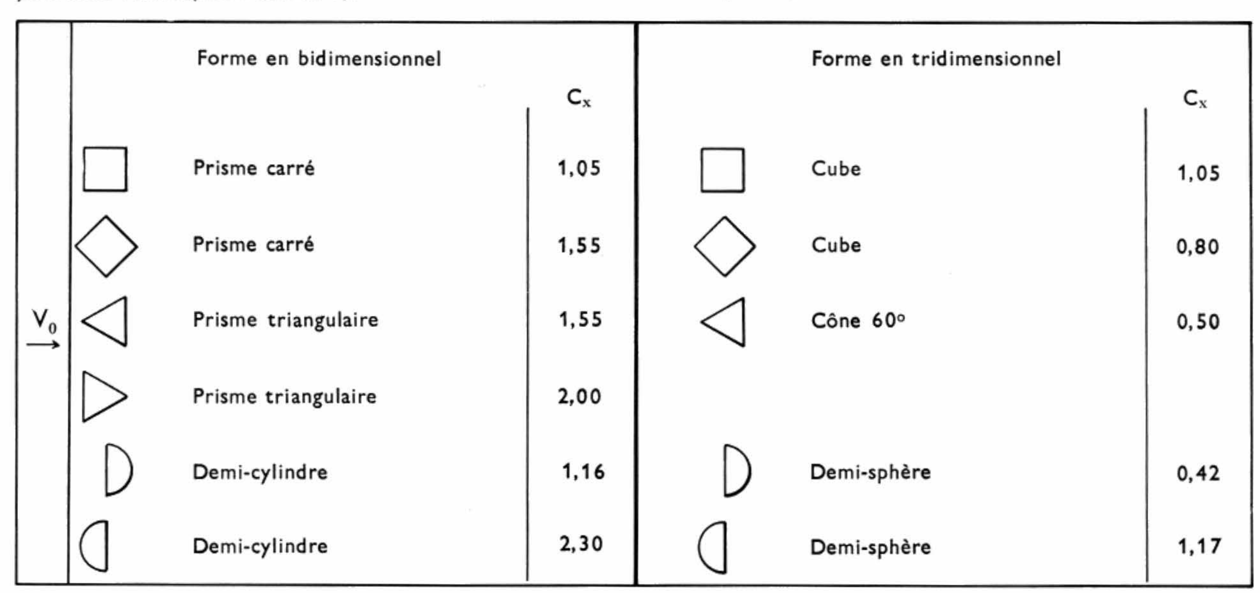
environ 120° du point d'arrêt. Le coefficient C_x diminue alors brusquement. La valeur du nombre de Reynolds critique varie entre 2.10^5 et 5.10^5.

4° *Sphère.* — La courbe $C_x = f(\mathcal{R})$ rappelle celle du cylindre. Notons que pour $\mathcal{R} < 0,3$ l'écoulement est laminaire et le coefficient de traînée est donné par la loi de Stokes : $C_x = \frac{24}{\mathcal{R}}$.

La valeur de $\mathcal{R}_c$ pour une sphère sert à caractériser la turbulence d'une veine d'air. On définit conventionnellement $\mathcal{R}_c$ par la valeur qui correspond à $C_x = 0,3$; ce nombre $\mathcal{R}_c$ est compris entre 150 000 et 380 000 (cette dernière valeur correspond au cas d'une sphère se déplaçant dans l'atmosphère standard).

cotes relatives $\frac{x}{l}$ et $\frac{y}{l}$, le rayon réduit ρ du bord d'attaque, défini par $\rho = \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{l}{e}\right)^2$, et l'angle τ des tangentes à l'intrados et à l'extrados au bord de fuite.

2° *Familles de profils.* — Il existe un très grand nombre de profils : ceux de Joukovski, de Karman-Trefftz ou de l'Institut de Göttingen sont maintenant délaissés au profit des profils étudiés systématiquement par l'organisme de recherche américain, le NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) qui a publié de nombreux catalogues de profils avec leurs cotes et leurs caractéristiques aérodynamiques.



V_0 →	Forme en bidimensionnel	C_x	Forme en tridimensionnel	C_x
	Prisme carré	1,05	Cube	1,05
	Prisme carré	1,55	Cube	0,80
	Prisme triangulaire	1,55	Cône 60°	0,50
	Prisme triangulaire	2,00		
	Demi-cylindre	1,16	Demi-sphère	0,42
	Demi-cylindre	2,30	Demi-sphère	1,17

5° *Corps à arêtes vives* (V. tableau ci-dessus). — La forme des lignes de courant est indépendante du nombre de Reynolds dans un large domaine. L'arête fixe la position de la ligne de décollement.

2.2. Profil dans un fluide réel. — Joukovski a établi une théorie du profil mais les prévisions qui en sont déduites diffèrent sensiblement des résultats expérimentaux.

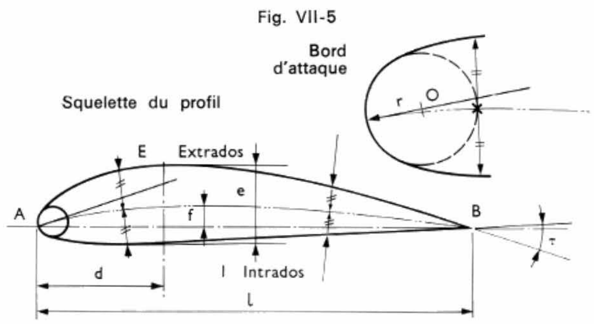
1° *Définitions.* — Le profil est symétrique si la *ligne moyenne AB* allant du bord d'attaque *A* au bord de fuite *B* est un segment de droite : la partie supérieure *AEB* ou *extrados* a alors une forme identique à la partie inférieure *AIB* ou *intrados*.

Si la ligne moyenne ou *squelette* du profil est incurvée (fig. VII-5), elle possède une flèche *f* et la corde *l* du profil est le segment de droite *AB*. La position (*d*) de la flèche maximale (*e*) est repérée par rapport au bord d'attaque. Le bord d'attaque est arrondi et il est parfaitement défini par la position du centre *O* du cercle de rayon *r*. *e*, *f* et *d* sont généralement rapportées à la corde du profil :

$$\frac{e}{l}, \frac{f}{l} \text{ et } \frac{d}{l}$$

Pour construire un profil, il faut connaître le tableau des

Fig. VII-5



Les premiers profils NACA, dits empiriques, sont repérés par quatre chiffres : les deux premiers indiquent respectivement les valeurs de $\frac{f}{l}$ et $\frac{d}{l}$, les deux derniers l'épaisseur relative maximale $\frac{e}{l}$ (V. fig. VII-6 a). Par la suite, les deux derniers chiffres indiqueront toujours l'épaisseur relative. La famille suivante, dite semi-laminaire, est repérée par cinq chiffres caractéristiques indiquant dans l'ordre un repère de courbure et le double de la valeur de

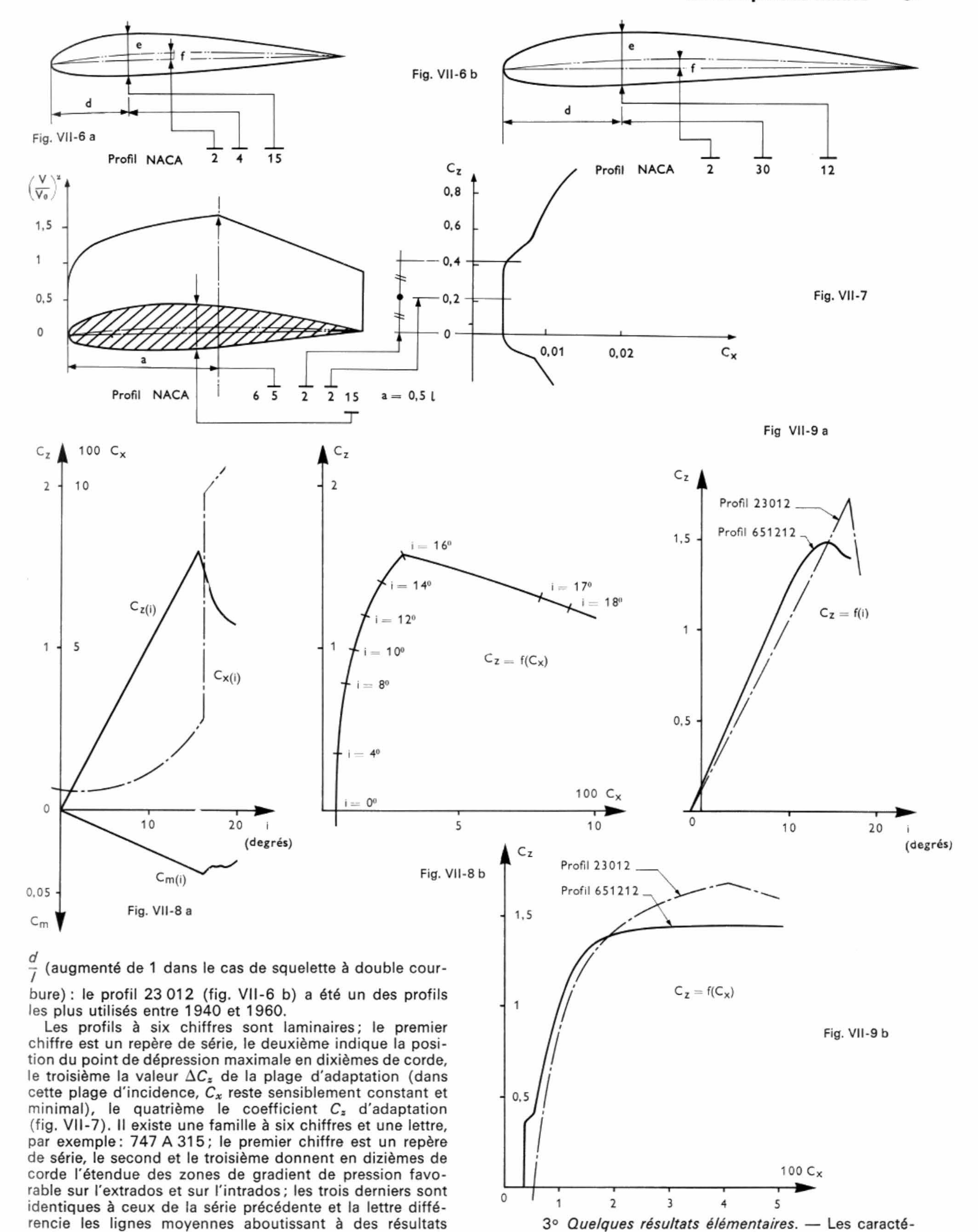


Fig. VII-6 a

Fig. VII-6 b

Fig. VII-7

Fig. VII-8 a

Fig. VII-8 b

Fig VII-9 a

Fig. VII-9 b

$\frac{d}{l}$ (augmenté de 1 dans le cas de squelette à double courbure) : le profil 23 012 (fig. VII-6 b) a été un des profils les plus utilisés entre 1940 et 1960.

Les profils à six chiffres sont laminaires ; le premier chiffre est un repère de série, le deuxième indique la position du point de dépression maximale en dixièmes de corde, le troisième la valeur ΔC_z de la plage d'adaptation (dans cette plage d'incidence, C_x reste sensiblement constant et minimal), le quatrième le coefficient C_z d'adaptation (fig. VII-7). Il existe une famille à six chiffres et une lettre, par exemple : 747 A 315 ; le premier chiffre est un repère de série, le second et le troisième donnent en dizièmes de corde l'étendue des zones de gradient de pression favorable sur l'extrados et sur l'intrados ; les trois derniers sont identiques à ceux de la série précédente et la lettre différencie les lignes moyennes aboutissant à des résultats analogues.

Les recherches se poursuivent sans cesse : depuis 1960 sont apparus les profils laminaires de l'école allemande (Dr Wortmann et Dr Eppler) et les profils surcritiques utilisables jusqu'à un nombre de Mach très proche de 1.

3° *Quelques résultats élémentaires.* — Les caractéristiques aérodynamiques d'un profil sont définies essentiellement par les courbes C_x, C_z et $C_m = f(i)$, i étant l'incidence en degrés (fig. VII-8 a). La polaire $C_z = f(C_x)$ (fig. VII-8 b) joue un rôle privilégié : elle permet de définir l'angle de vol pour accomplir une mission déterminée.

Les effets de la viscosité se manifestent essentiellement par l'existence d'une traînée aérodynamique ($C_x > 0$) et l'apparition d'un décollement de l'écoulement sur l'extrados, entraînant une perte de portance telle que la courbe $C_z = f(i)$ ne reste linéaire que sur une quinzaine de degrés. Il est intéressant de comparer les résultats expérimentaux relatifs à deux profils NACA 23 012 et 651 212 (fig. VII-9 a et b) ; on reprochait au premier de perdre une grande partie de sa portance à l'incidence dite de *décrochage :* le second n'a pas ce défaut mais sa traînée croît considérablement à partir de cette incidence.

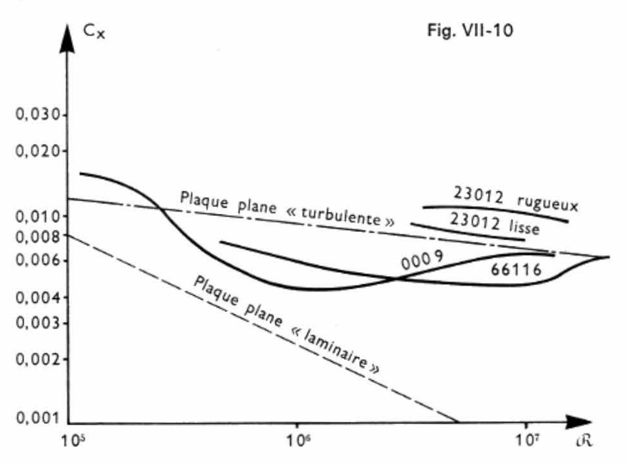


Fig. VII-10

4° *Influence du nombre de Reynolds et de l'état de surface.* — La rugosité et l'état de propreté de la surface influent beaucoup sur C_x. Par ailleurs, C_x varie aussi avec la valeur de $\mathcal{R}$ (fig. VII-10). Il en est de même de la portance maximale du profil, C_z max (fig. VII-11).

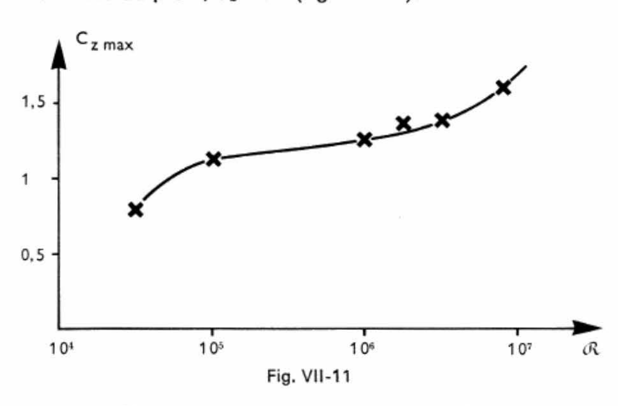


Fig. VII-11

5° *L'aile.* — Considérée comme un élément de la cellule d'un avion, elle est constituée par une succession de profils juxtaposés dont les dimensions, la position en plan (fig. VII-12) et l'incidence relative varient d'une manière continue de l'emplanture à l'extrémité ; les profils successifs, homothétiques pour des performances ordinaires, ont des cotes relatives variables sur les ailes très élaborées.

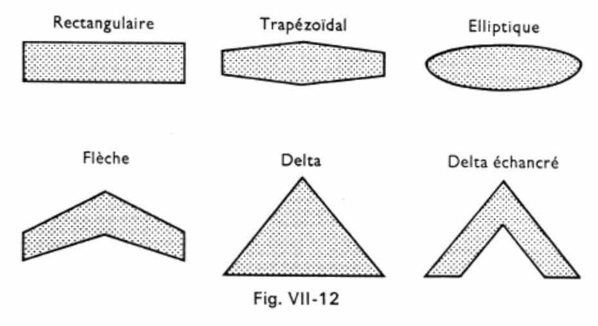


Fig. VII-12

Prandtl a élaboré la théorie de l'aile d'envergure limitée dans le domaine subsonique incompressible ; Glauert l'a étendue au domaine compressible et Jones a étudié le comportement des ailes d'envergure réduite.

3. L'AVION

3.1. Généralités

1° *Description.* — Un avion comprend :

— Le planeur (fig. VII-13) : ailes, fuselage, empennages et gouvernes (de manœuvre et de stabilité).
— Les groupes moto-propulseurs.
— L'équipement.

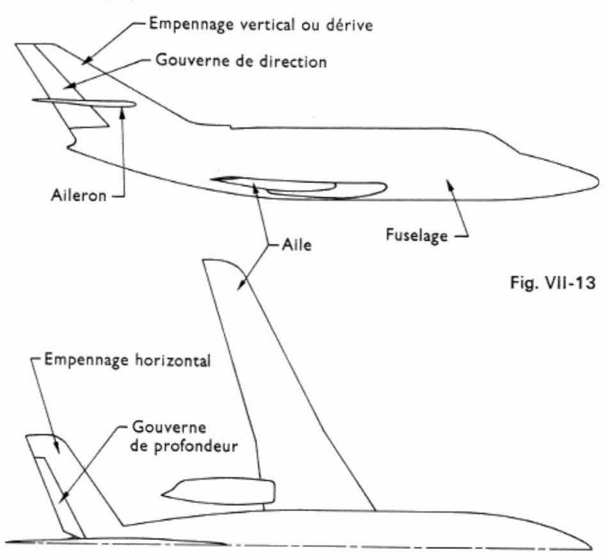


Fig. VII-13

2° *Les trièdres de référence.* — Soit G le centre de gravité de l'avion. Deux trièdres orthonormés sont utilisés (fig. VII-14) :

a) Le trièdre $Gxyz$ lié à l'avion (trièdre avion) :
Gx : parallèle à la corde du profil d'aile (du bord de fuite vers le bord d'attaque).
Gy : perpendiculaire au plan de symétrie et dirigé vers la droite du pilote.
Gz : complète le trièdre direct (donc dirigé vers les pieds du pilote).

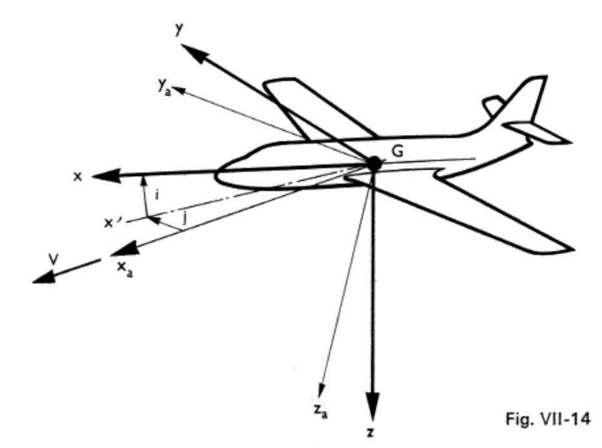


Fig. VII-14

b) Le trièdre aérodynamique $Gx_ay_az_a$.
Gx_a : parallèle à la vitesse et dirigé vers l'avant.
Gz_a : perpendiculaire au plan x_aOy et dirigé vers les pieds du pilote.
Gy_a : complète le trièdre direct.
Soit Gx' la projection de Gx_a dans le plan de symétrie.

On pose : $(Gx', Gx) = i$: incidence
$(Gx_a, Gx) = j$: dérapage.

i est positif lorsque la composante du vecteur vitesse-air $\vec{V}$ suivant Gz est positive ; j est positif lorsque la composante de $\vec{V}$ suivant Gy est positive.

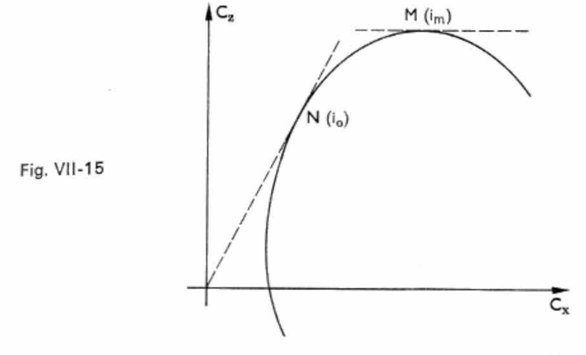


Fig. VII-15

3° *Composantes de la résultante aérodynamique* $\vec{R}$ *et du moment résultant* $\vec{M}$. — On considère en général les projections de $\vec{R}$, résultante du torseur des forces exercées par le fluide sur l'avion, sur les axes du *trièdre aérodynamique*. On pose :

$$\vec{R}\begin{cases} X_a = -\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S C_x \\ Y_a = -\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S C_y \\ Z_a = -\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S C_z \end{cases}$$

$(-X_a)$ est la traînée, $(+Y_a)$ est la force latérale, $(-Z_a)$ est la sustentation (ou portance).

On considère en général les projections de $\vec{M}$, moment résultant du torseur des forces, sur le trièdre de référence *Gxyz* (trièdre avion) :

$$\vec{M}\begin{cases} L = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 Sl C_l \\ M = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 Sl C_m \\ N = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 Sl C_n \end{cases}$$

L est le moment de roulis (C_l: coefficient de moment de roulis) ;
M est le moment de tangage (C_m: coefficient de moment de tangage) ;
N est le moment de lacet (C_n: coefficient de moment de lacet).

La longueur de référence *l* est la corde de profil, la surface de référence *S* est en général la surface de référence totale des ailes y compris celle interceptée par le fuselage. On mesure les six composantes à l'aide de balances.

4° *Polaire de l'avion*. — La polaire de l'avion $C_z = f(C_x)$ se détermine par des essais en soufflerie. On peut écrire :

$$C_x \text{ (avion)} = C_x \text{ (ailes)} + C'_x$$

En première approximation l'accroissement de traînée C'_x étant indépendant de l'incidence (pour des incidences usuelles), la polaire de l'avion se déduit de la polaire d'aile par une translation parallèle à l'axe des C_x.

3.2. Vol horizontal rectiligne et uniforme

1° *Équation du vol*. — L'avion est soumis à son poids $m\vec{g}$, à la résultante $\vec{R}$ des forces aérodynamiques, à la poussée du moteur (ou à la traction de l'hélice) $\vec{F}$:

$$m\vec{g} + \vec{R} + \vec{F} = m\vec{\gamma}$$

Or, l'accélération $\vec{\gamma}$ du centre de gravité *G* est nulle puisque le mouvement est rectiligne et uniforme :

$$m\vec{g} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0}$$

Projetons sur les axes Gx_a (horizontal) et Gz_a (vertical) du trièdre aérodynamique :

$$X_a + F = 0 ; \quad mg + Z_a = 0$$

soit : $F = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S C_x$ (équation de traction)

$mg = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S C_z$ (équation de sustentation)

2° *Vitesse minimale*. — Le poids *mg* étant connu, la vitesse nécessaire au vol horizontal est donnée par l'équation de sustentation :

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\,mg}{\rho_0 S} \cdot \frac{1}{C_z}}$$

V_0 est minimal lorsque C_z est maximal : point *M* de la polaire (fig. VII-15), correspondant à l'incidence i_m. À l'atterrissage, on utilise des dispositifs hypersustentateurs qui augmentent le maximum de C_z.

3° *Incidence optimale* (i_0). — C'est l'incidence qui correspond, pour une vitesse donnée, à la traction minimale. En divisant les deux équations précédentes membre à membre on obtient :

$$\frac{F}{mg} = \frac{C_x}{C_z}$$

F est minimal lorsque le rapport $\frac{C_z}{C_x}$, qu'on appelle *finesse* de l'avion, est maximal : point *N* de la polaire correspondant à l'incidence i_0 (fig. VII-15).

4° *Puissance minimale*. — Multiplions par V_0 les deux membres de l'équation de traction. Le premier membre représente la puissance de traction P_u. On obtient :

$$P_u = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^3 S C_x$$

En éliminant V_0 entre cette équation et l'équation de sustentation, on trouve l'expression de la puissance utile en fonction des coefficients de traînée et de sustentation :

$$P_u = \left(\frac{2}{\rho . S}\right)^{\frac{1}{2}} (mg)^{\frac{3}{2}} \frac{C_x}{C_z^{3/2}}$$

La courbe $\frac{C_z^{3/2}}{C_x} = f(C_z)$ de la figure VII-16 montre que la puissance est minimale pour le point *P*, d'incidence i_p comprise entre i_0 et i_m.

Lorsque le moteur fournit une puissance supérieure à la puissance nécessaire au vol horizontal, l'excédent de puissance peut être utilisée pour monter. L'altitude maximale, ou *plafond*, est atteinte quand toute la puissance

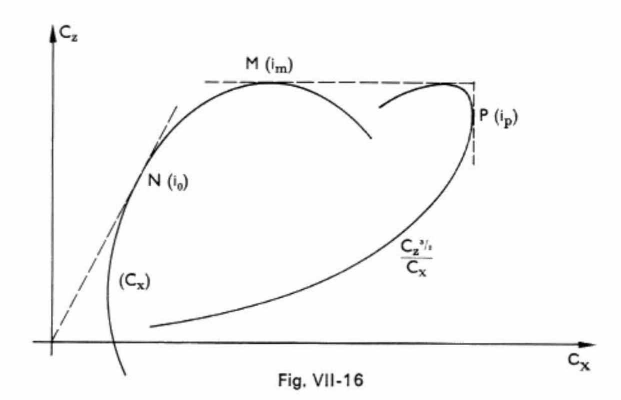


Fig. VII-16

est utilisée pour la sustentation en vol horizontal : il faut donc voler sous l'incidence i_p appelée pour cette raison *incidence de plafond*.

3.3. Vol oblique rectiligne et uniforme

1° *Montée*. — Soit α l'inclinaison de la trajectoire sur l'horizontale (V. fig. VII-17). L'équation :

$$m\vec{g} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0}$$

donne, en projetant les vecteurs sur Gx_a et Gz_a :

$$-mg \sin\alpha - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_x + F = 0$$

$$mg \cos\alpha - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_z \quad = 0$$

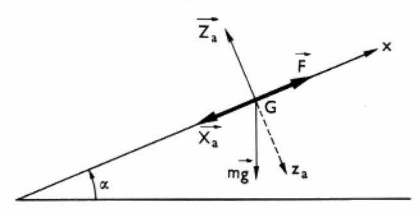


Fig. VII-17

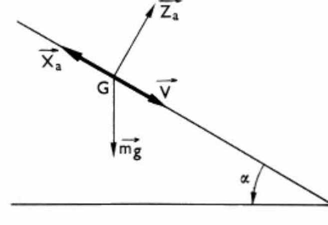


Fig. VII-18

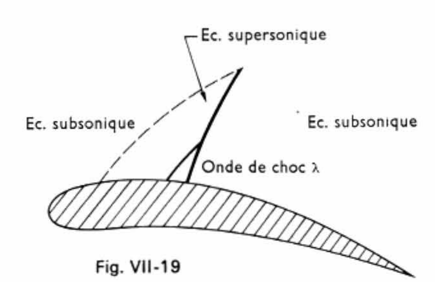


Fig. VII-19

Pour une poussée (ou une force de traction) F et une incidence i données, l'angle α se détermine par la relation suivante (déduite des relations ci-dessus en faisant $\cos \alpha \approx 1$) :

$$\sin \alpha = \frac{F}{mg} - \frac{C_x}{C_z}$$

La puissance s'obtient à partir de la relation où figure F :

$$P_u = F\,V = \frac{1}{2}\rho\,S\,V^3\,C_x + mg\,V \sin \alpha$$

$\frac{1}{2}\rho\,S\,V^3\,C_x$ est la puissance résistante de traînée.

$mg\,V \sin \alpha$ est la puissance de montée.

La vitesse ascensionnelle est donc :

$$V_z = V \sin \alpha = \frac{\text{Puissance moteur} - \text{Puissance traînée}}{mg}$$

Sa valeur maximale correspond à la valeur maximale du numérateur : pour monter le plus rapidement possible, il faut voler sous l'incidence de plafond.

2° *Descente planée* (fig. VII-18). — Les moteurs étant stoppés, l'équation générale du mouvement devient ($\vec{F} = \vec{0}$) :

$$\vec{mg} + \vec{R} = \vec{0}$$

D'où :

$$mg \cos \alpha = \frac{1}{2}\rho\,V^2\,S\,C_x$$

$$mg \sin \alpha = \frac{1}{2}\rho\,V^2\,S\,C_z$$

et :

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{C_z}{C_x}$$

La pente de la trajectoire est égale à l'inverse de la finesse. Pour C_z donné, la vitesse a pour valeur :

$$V = \sqrt{\frac{2\,mg \cos \alpha}{\rho\,S} \cdot \frac{1}{C_z}}$$

La composante verticale V_z de la vitesse a pour valeur absolue :

$$V_z = \sqrt{\frac{2\,mg}{\rho\,S}} \cdot \frac{C_x}{C_z^{\frac{3}{2}}} \cdot (\cos \alpha)^{1/2}$$

Comme $\cos \alpha \approx 1$, on voit que V_z est minimal pour l'incidence de plafond.

4. AÉRODYNAMIQUE DES GRANDES VITESSES

Lorsque le nombre de Mach à l'infini M_0 dépasse $\frac{1}{3}$ environ, le phénomène de compressibilité n'est plus négligeable et l'on remplace l'équation de Bernoulli par celle de Barré de Saint-Venant. Si l'on augmente la vitesse de l'avion, c'est d'abord au niveau de l'extrados que l'on atteint la vitesse du son. La valeur correspondante de M_0 est dite critique (M_{0c}). Nous pouvons donc considérer les trois genres d'écoulement suivants :

a) $M_0 < M_{0c}$: écoulement entièrement subsonique

b) $M_{0c} < M_0 < 1$: écoulement transsonique

c) $M_0 > 1$: écoulement supersonique.

4.1. Écoulement subsonique. — C'_z et C'_{xh} étant les valeurs des coefficients de sustentation et de traînée de pression en fluide incompressible, les valeurs en fluide compressible deviennent :

$$C_z = \frac{C'_z}{\sqrt{1 - M_0^2}} \; ; \quad C_{xh} = \frac{C'_h}{\sqrt{1 - M_0^2}}$$

4.2. Écoulement transsonique. — L'écoulement peut être considéré comme s'effectuant dans une suite de tuyères juxtaposées ; dans chacune d'elles apparaît un col sonique suivi d'un écoulement supersonique qui se retransforme en écoulement subsonique par l'intermédiaire d'une onde de choc normale. La pression en aval de l'onde de choc se transmet vers l'amont par la couche limite ; il en résulte un décollement de celle-ci et une onde de choc oblique. L'ensemble des deux ondes de chocs, normale et oblique, constitue l'onde de choc *lambda* (fig. VII-19).

Lorsque M_0 augmente, l'onde se déplace vers le bord de fuite en augmentant d'intensité, en même temps qu'une autre onde de choc lambda apparaît sur l'intrados.

Les variations de C_x et de C_z en fonction de M_0 sont données par la figure VII-20.

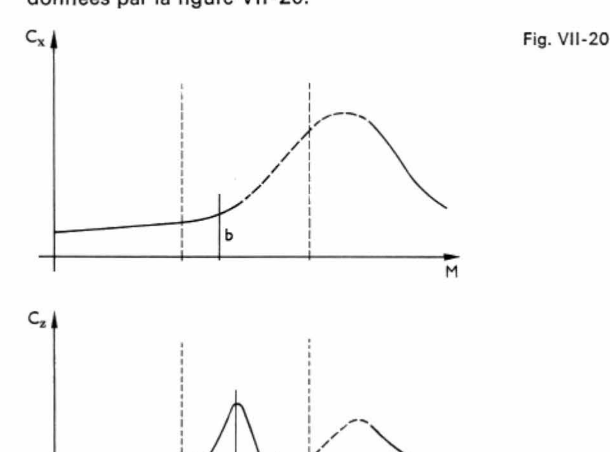


Fig. VII-20

a. Apparition de l'onde de choc sur l'extrados. — b. Décollement en arrière de l'onde de choc et accroissement brusque de la traînée. — c. Décollement complet et début de chute de la sustentation. — d. Apparition de l'onde de choc sur l'intrados

Notons que l'on améliore l'écoulement et que l'on augmente la valeur de M_{0c} en employant des ailes en flèche (fig. VII-21). Pour de telles ailes tout se passe comme si l'écoulement avait, par rapport à l'aile, une vitesse V_1 telle que :

$$V_1 = V \cos \theta$$

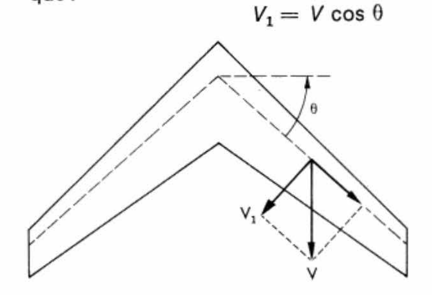


Fig. VII-21

4.3. Écoulement supersonique. — Sur un profil lenticulaire l'écoulement possède, pour $M_0 > 1$, les caractéristiques présentées par la figure VII-22.

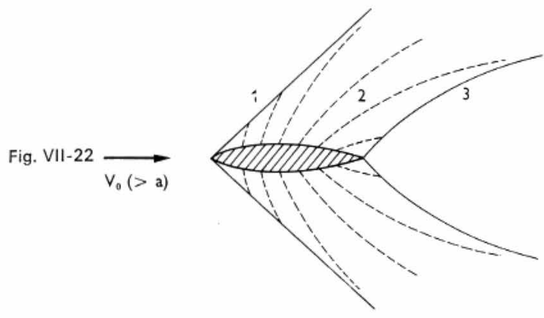


Fig. VII-22

Lorsque l'angle φ des tangentes au profil sur le bord d'attaque dépasse une certaine valeur φ_m, pour une vitesse donnée, l'onde de choc se détache en avant. Les différentes valeurs de φ_m sont données par le tableau de la figure VII-23.

φ_m	8°	19°	38°	57°	80°	90°40'
M_0	1,2	1,4	1,8	2,4	4,5	∞

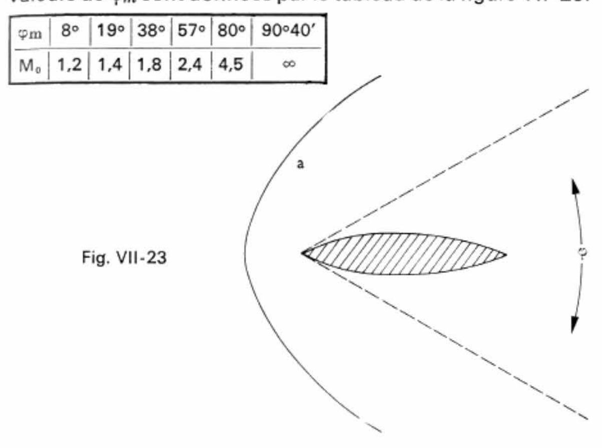


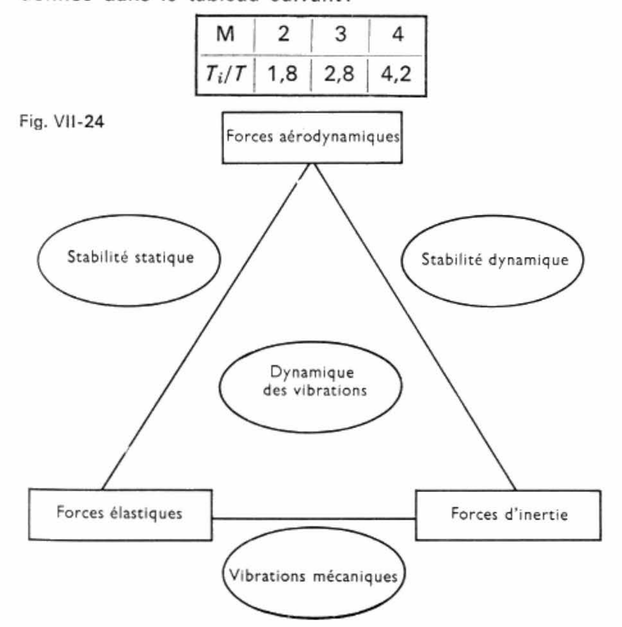
Fig. VII-23

La courbe $C_x = f(M)$ de la figure VII-20 montre qu'aux vitesses supersoniques C_x diminue quand la vitesse augmente. Comme les écoulements sont beaucoup plus stables qu'en régime transsonique, on a intérêt à réduire le plus possible la durée du passage vers le régime supersonique.

L'accroissement de vitesse dans le régime supersonique est limité par l'accroissement de température admissible au voisinage du point d'arrêt. La température du point d'arrêt T_i rapportée à la température statique T de l'air ambiant est donnée dans le tableau suivant :

M	2	3	4
T_i/T	1,8	2,8	4,2

Fig. VII-24



5. AÉROÉLASTICITÉ

Le triangle aéroélastique (fig. VII-24) permet de classer l'ensemble des phénomènes dus aux différentes actions mécaniques s'exerçant sur une structure en quatre groupes, en fonction du couplage des forces en présence : les *vibrations mécaniques* résultent de l'action conjointe des forces élastiques et des forces d'inertie mises en jeu lors d'un mouvement ; la *stabilité dynamique* fait intervenir les forces aérodynamiques et les forces d'inertie ; les forces élastiques et les forces aérodynamiques se conjuguent dans le domaine de la *stabilité statique;* enfin, les *vibrations aéroélastiques* résultent de l'action simultanée des forces aérodynamiques, élastiques et d'inertie. L'aéroélasticité est l'étude des phénomènes où interviennent les forces aérodynamiques.

5.1. Stabilité statique. — Les charges aérodynamiques exercées sur une structure peuvent provoquer une légère déformation, qui entraîne évidemment une nouvelle répartition de ces charges. La situation peut alors évoluer de deux façons : ou bien la structure atteint une nouvelle position d'équilibre et il y a stabilité, ou bien le mouvement *diverge* (il y a instabilité statique) et la déformation croît rapidement jusqu'à la rupture de la structure.

1° *Divergence statique.* — Il s'agit de l'instabilité statique de la résistance à la déformation d'une surface portante, sous l'action des forces aérodynamiques. Examinons, par exemple, le comportement en torsion d'une aile d'avion : on appelle axe élastique, l'axe autour duquel les profils se calent en rotation. Soit la section droite d'une aile (fig. VII-25), où E est la trace de l'axe élastique et M le moment aérodynamique dû au déplacement du profil dans

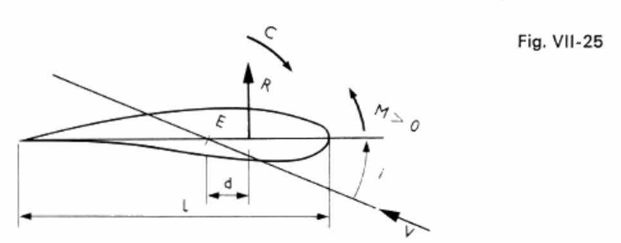


Fig. VII-25

un vent de vitesse V sous une incidence i. Si l'aile est soumise à un accroissement de vitesse ΔV, M s'accroît de ΔM et i de Δi. Il en résulte un nouvel accroissement de l'action aérodynamique, ainsi que du couple de rappel en torsion C de la structure. Dans le cas où l'accroissement du moment aérodynamique est supérieur à l'accroissement du rappel élastique (fig. VII-26), il y a divergence du mouvement et l'aile casse.

La vitesse V_d à partir de laquelle apparaît ce phénomène est appelée *vitesse critique de divergence*.

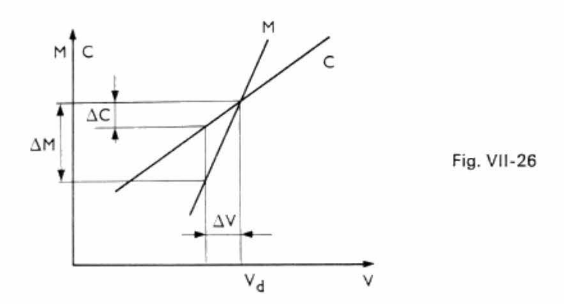


Fig. VII-26

2° *Inversion de l'efficacité d'une gouverne.* — L'efficacité est le rapport de la grandeur caractérisant le mouvement recherché et de l'angle de braquage δ de la gouverne. Pour les ailerons, l'efficacité se définit par le rapport de la vitesse angulaire de roulis p de l'avion et de δ. Lorsque la vitesse de l'avion croît, la distribution des charges le long du profil se modifie, entraînant une déformation de l'aileron ou de ses attaches dont l'effet est identique à celui d'une diminution du braquage. L'efficacité p/δ augmente d'abord,

puis diminue en fonction de la vitesse. La vitesse d'inversion des gouvernes, correspondant à un nombre de Mach M_1, est atteinte pour $\frac{p}{\delta} = 0$: au-dessus de cette vitesse, à un accroissement du braquage correspond un mouvement inverse du mouvement recherché (fig. VII-27).

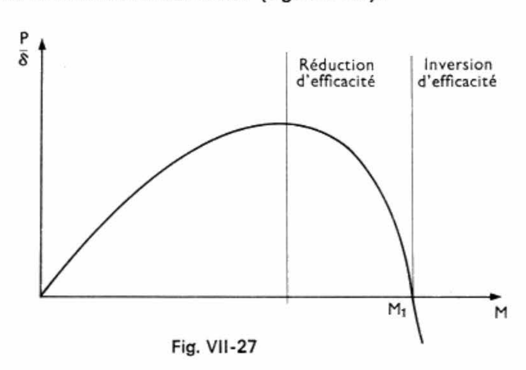
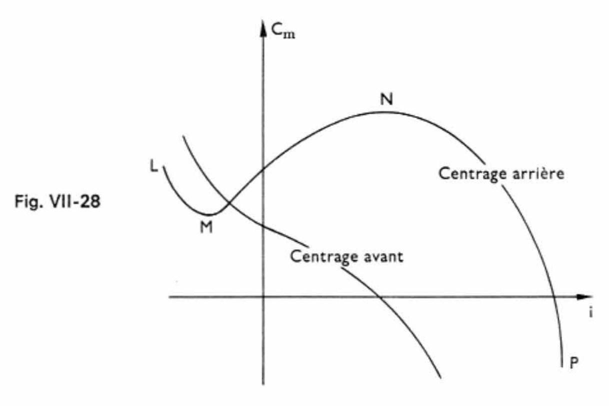


Fig. VII-27

5.2. Stabilité dynamique. — L'étude du mouvement de l'avion autour de son centre de gravité s'effectue à partir des courbes donnant les moments de tangage, de roulis et de lacet, en fonction des angles permettant de repérer la position de l'avion dans le trièdre aérodynamique. Ces courbes permettent également d'étudier la stabilité de ce mouvement. La stabilité de l'équilibre en tangage, par exemple, s'effectue à partir des familles de courbes $C_m = f(i)$, le paramètre étant soit la position du centre de gravité dans la structure (ou *centrage*) soit l'angle de braquage de la gouverne. Ainsi, les courbes de la figure VII-28 correspondent, pour un angle de braquage δ

Fig. VII-28



donné, à deux centrages différents, avant et arrière. Pour que l'équilibre soit stable, il faut que la dérivée $\frac{dC_m}{di}$ soit négative : une augmentation d'incidence provoque alors une diminution du moment de tangage, ce qui se traduit par une tendance à la diminution de l'incidence ; d'où stabilité. On voit que, si l'équilibre est toujours stable pour un centrage avant, pour un centrage arrière il n'est stable qu'en *LM* et *NP*; et il est instable en *MN*. Les stabilités de roulis et de lacet s'étudient de la même façon.

5.3. Vibrations aéroélastiques. — Ces vibrations se rencontrent sur de nombreuses structures : engins se déplaçant dans un fluide tel que l'eau ou l'air, bâtiments et ouvrages d'art soumis au vent naturel. Examinons quelques exemples :

1° *Réponse dynamique structurale.* — L'avion pénétrant dans une rafale, ou atterrissant brusquement, subit des surcharges importantes variables en chaque point de sa structure. La figure VII-29 donne, en fonction du temps, le rapport $\frac{\gamma_e}{\gamma_0}$ des accélérations relevées à l'extrémité et à l'encastrement de l'aile d'un avion volant à grande vitesse et pénétrant dans une rafale.

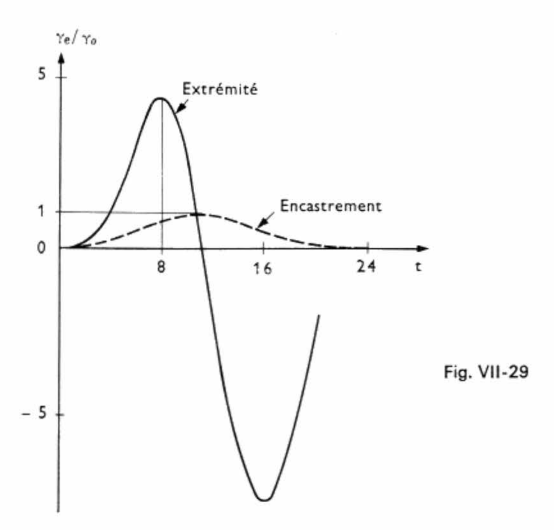


Fig. VII-29

2° *Tremblement* (ou *buffeting*). — Il s'agit d'une mise en vibration désordonnée d'une structure imparfaitement rigide soumise à un vent agissant de manière chaotique en grandeur et en direction : la turbulence atmosphérique et les sillages importants laissés par tout ou partie d'un engin en mouvement sont générateurs de tels vents. L'énergie mise en jeu est considérable et il peut en résulter, soit la rupture immédiate d'éléments tels que les empennages horizontaux ou verticaux d'un avion, soit la fatigue de ces éléments avec formation de criques tout aussi dangereuses.

3° *Flottement aérodynamique* (ou *flutter*). — C'est une instabilité vibratoire provenant du couplage de plusieurs modes de vibrations. Pour étudier cette instabilité, il faut déterminer les modes de vibration libres de la struc-

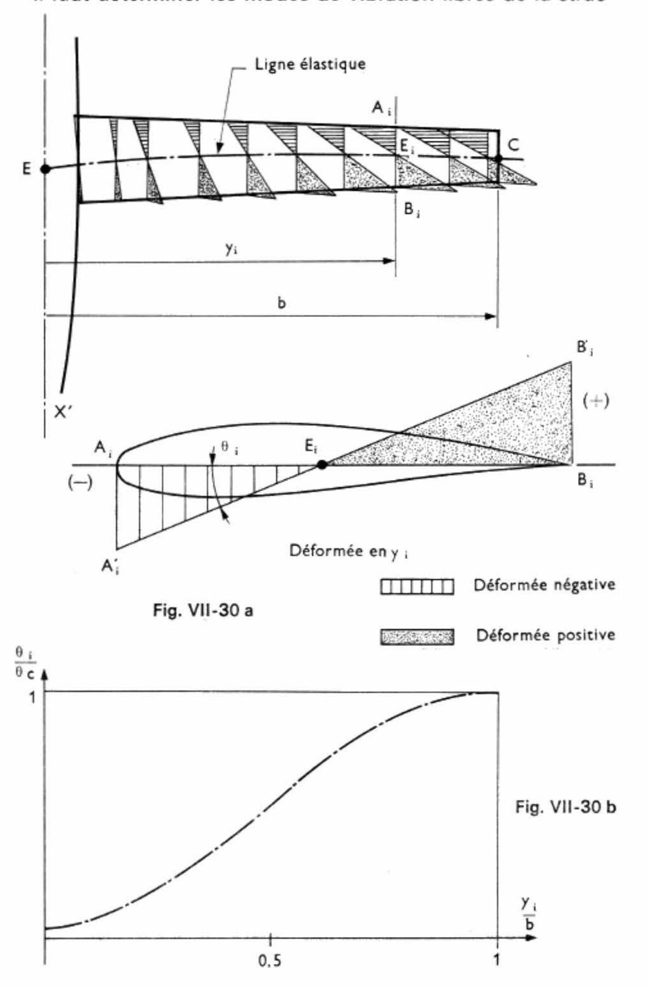


Fig. VII-30 a

Fig. VII-30 b

ture. Chacun de ces modes se caractérise par sa « déformée » et par sa fréquence de vibration propre. La représentation d'une déformée est matérialisée par les figures VII-30 a et b : la première montre les déformées de torsion dans chaque tranche d'une aile de planeur et la seconde, la courbe lissée de ces déformées rapportées à la déformation en extrémité d'aile.

Lors de l'établissement de l'avant-projet, dès que la définition structurale est achevée, les modes propres de déformation sont calculés. Avant les premiers vols de l'avion, un prototype est soumis à des essais de vibration au sol pour vérification des études théoriques. Enfin, pendant les essais en vol, le domaine de vol est exploré systématiquement : des pétards convenablement fixés sont allumés dans des configurations de vol bien connues et les relevés des déformées et des amortissements correspondants renseignent sur le comportement de l'avion.

Les remèdes au flutter sont les suivants :

— l'*augmentation de rigidité,* qui recule la vitesse de flutter, mais qui entraîne en général une augmentation de masse ;

— l'*emploi de masses additionnelles* qui, judicieusement placées, permettent l'équilibrage statique et dynamique d'une gouverne et évitent parfois le couplage mécanique de différents modes de déformation (ce procédé entraîne également une augmentation de masse) ;

— *le déplacement ou le carénage d'un organe* tel que moteur, aileron, empennage ou tab, qui peuvent supprimer un décollement de l'air, faire disparaître un couplage aérodynamique ou supprimer un écoulement instationnaire.

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

CHAPITRE PREMIER
GÉNÉRALITÉS

1. BUT DE LA RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

La plupart des activités techniques ont pour but la réalisation de *constructions* au sens le plus large du terme : bâtiments, ponts, barrages, conduites, mécanismes, machines ou véhicules, qui doivent être *avant tout en équilibre*.

Toutes ces constructions supportent des charges : poids propre pour un bâtiment, poids propre et poids du véhicule qui le traverse pour un pont, pression de l'eau pour une conduite, force centrifuge pour un volant. Ces charges se transmettent aux éléments formant la construction : chacun est soumis aux *forces de liaison* exercées par les éléments voisins et certains, comme le tablier d'un pont, sont en plus soumis directement aux *charges* supportées par la construction. *Sous l'action de ces forces, il faut et il suffit que chaque élément soit en équilibre pour que la construction soit en équilibre.*

Les lois de la mécanique (équations d'équilibre du solide) déterminent, pour chaque élément, des conditions d'équilibre qui sont insuffisantes, car la mécanique repose sur l'hypothèse du *solide indéformable*, c'est-à-dire dont la forme est invariable quelle que soit l'intensité des forces exercées sur lui.

Les *solides réels*, sans exception, se déforment sous l'action d'un effort, même très faible : leurs déformations, par exemple l'allongement du fil qui supporte un lustre, sont en général trop petites pour être observées directement et il faut employer des instruments de précision pour les mesurer. Dans le cas des matériaux de construction, ces mesures montrent que les *déformations* ont les propriétés suivantes :

1° Elles sont *élastiques tant que l'effort reste inférieur à la charge de limite élastique* (valeur caractéristique de l'élément considéré) : dès cessation de l'effort, l'élément reprend *exactement* sa forme initiale comme un ressort ; *les déformations élastiques sont extrêmement petites*, de l'ordre du millième de la dimension initiale.

2° Elles sont *permanentes si l'effort dépasse la charge de limite élastique :* malgré la cessation de l'effort, l'élément reste aussi déformé que sous charge ; les déformations permanentes sont très grandes, souvent plus du dixième de la dimension initiale.

3° Elles deviennent *instables dès que l'effort atteint la charge de rupture* (autre caractéristique de l'élément) et un processus irréversible se déclenche : sans accroissement de l'effort, les déformations augmentent spontanément jusqu'à la rupture.

Bien entendu, les forces maximales exercées sur un élément doivent être inférieures à sa charge de rupture. Elles doivent même être inférieures à sa charge de limite élastique : ses déformations, extrêmement petites, sont alors négligeables devant ses dimensions et, à cette condition, l'élément peut être considéré comme indéformable.

Les conditions d'équilibre d'un élément de construction sont donc les conditions d'équilibre du solide indéformable de la mécanique et des conditions complémentaires de déformation résultant des propriétés des matériaux.

La résistance des matériaux a pour but de déterminer les caractéristiques (*matière*, *dimensions* et *formes*) des éléments d'une construction pour que chaque élément résiste *sans déformation permanente* aux *forces maximales* qui lui seront appliquées en service.

Pour y parvenir, d'une part, il faut analyser rationnellement le mode d'action des forces extérieures sur la matière d'un élément et calculer les *sollicitations* correspondantes, d'autre part, il faut étudier expérimentalement le comportement des matériaux sollicités par des efforts et déterminer leurs *caractéristiques mécaniques*.

2. HYPOTHÈSES DE BASE

Le matériau est supposé homogène et isotrope : en chacun de ses points, et dans toutes les directions, il doit avoir les mêmes propriétés mécaniques. En fait, les matériaux ne sont ni parfaitement homogènes ni isotropes : un coefficient de sécurité intervient donc dans les calculs de résistance des matériaux pour en tenir compte.

Le matériau est également supposé élastique, c'est-à-dire que ses déformations sont considérées comme proportionnelles aux sollicitations.

Une poutre doit être longue par rapport à ses dimensions transversales (fig. I-1) : la longueur de sa ligne moyenne

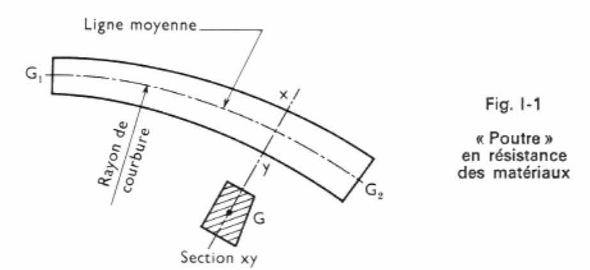


Fig. I-1

« Poutre » en résistance des matériaux

doit être supérieure à dix fois la plus grande des dimensions transversales. Les sections transversales peuvent être quelconques mais doivent varier de façon progressive. La ligne moyenne doit être plane, rectiligne ou courbe, et son rayon de courbure supérieur à six fois la plus grande des dimensions transversales. Si les poutres étudiées s'éloignent de ces conditions idéales, il faut majorer le coefficient de sécurité.

Par ailleurs, les sections planes, perpendiculaires à la ligne moyenne, sont supposées rester planes après déformation du corps.

3. MÉTHODE DE RÉSOLUTION DES PROBLÈMES

Les poutres, les organes de machines sont en contact avec des pièces voisines qui constituent les appuis de l'organe à calculer.

Il faut tout d'abord déterminer le système des forces extérieures qui agissent sur l'organe étudié : action à distance (poids propre de l'organe, par exemple) ; charges ou forces directement appliquées ; forces d'inertie si l'organe a un mouvement non rectiligne et uniforme ; actions aux appuis.

En général, seules les actions aux appuis sont inconnues. L'organe ou le système à étudier sont donc isolés et les actions aux appuis déterminées par les méthodes de résolution de la statique graphique, ou par le calcul (utilisation des équations d'équilibre).

On étudie ensuite les *phénomènes internes au matériau* de l'organe considéré. La méthode consiste à isoler l'organe ou seulement une partie de celui-ci (exemple : fig. I-2 et I-3) : pour rétablir l'équilibre, il faut ajouter, dans

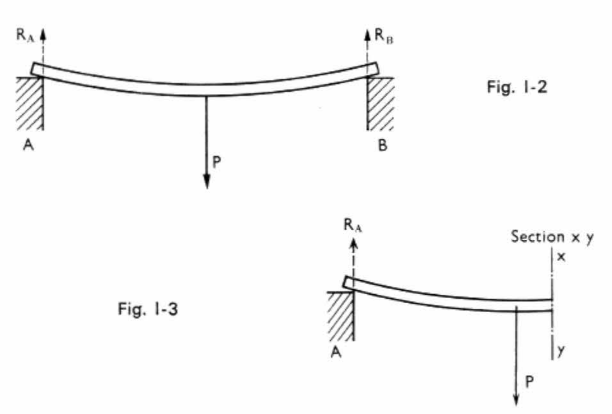


Fig. I-2

Fig. I-3

la section *xy* et à l'intérieur de la matière, un système de forces équivalant à l'action de la partie enlevée sur la partie à étudier. Au premier stade, c'est un problème de statique. Sa solution (système de forces réduit à une force et à un couple) est la résultante du système des sollicitations élémentaires agissant sur les éléments de la surface de la section *xy* ; elle permet de déterminer ces sollicitations en étudiant leur répartition dans la section *xy* à l'aide des hypothèses de base de la résistance des matériaux.

En ce qui concerne les actions des appuis sur la poutre ou sur l'organe étudié, les forces doivent être définies complètement par la détermination de tous les éléments : le point d'application, la droite support, le sens, l'intensité. L'analyse de la nature des appuis (appui simple, articulation, encastrement) permet de préciser à l'avance une ou plusieurs de ces inconnues. En général, en résistance des matériaux, on néglige les frottements de contact entre le système étudié et les appuis.

4. SOLLICITATIONS SIMPLES

Plusieurs sollicitations simples sont distinguées :

4.1. Extension (fig. I-4). — Une barre est sollicitée à l'extension si les forces extérieures qui lui sont appliquées se réduisent à deux forces égales, directement opposées, qui tendent à l'allonger. Exemple : un câble soulevant une charge est sollicité à l'extension.

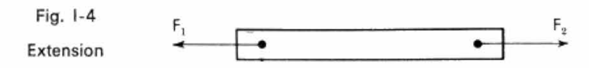


Fig. I-4
Extension

4.2. Compression (fig. I-5). — Un corps est sollicité à la compression si les forces extérieures se réduisent à deux forces égales, directement opposées, qui tendent à le raccourcir. Exemple : un pilier supportant une partie de la masse d'un plancher est sollicité à la compression.

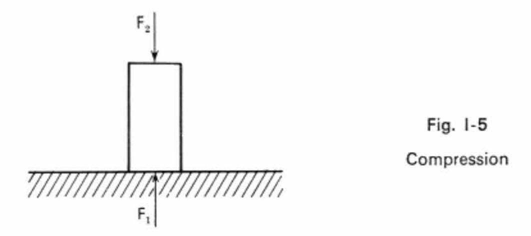


Fig. I-5
Compression

4.3. Cisaillement (fig. I-6). — Un corps est sollicité au cisaillement si les forces extérieures se réduisent à deux forces égales, parallèles et opposées, qui tendent à le séparer en deux tronçons qu'elles font glisser, l'un par rapport à l'autre, suivant le plan d'une section parallèle à leur direction. Exemple : les axes des gonds d'une porte sont sollicités au cisaillement.

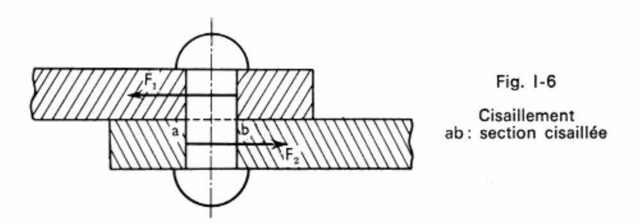


Fig. I-6
Cisaillement
ab : section cisaillée

4.4. Torsion (fig. I-7). — Un corps est sollicité à la torsion si les forces extérieures se réduisent à deux couples de sens opposés, dont les axes sont confondus avec son axe géométrique. L'un des couples peut être constitué par un

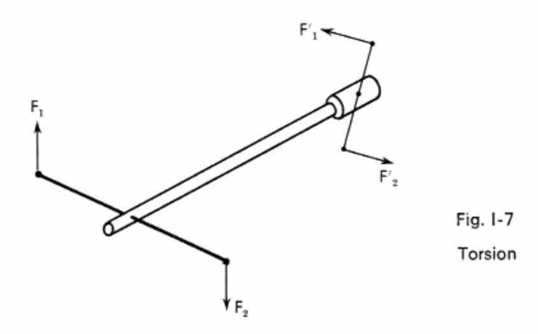


Fig. I-7
Torsion

encastrement. Sous l'effet du couple de torsion, les génératrices du cylindre s'enroulent en hélices autour de l'axe géométrique. Exemple : la tige d'un tournevis est sollicitée à la torsion.

4.5. Flexion (fig. I-8). — Un corps est sollicité à la flexion simple si les forces extérieures se réduisent à un système de forces perpendiculaires à son axe, ou de couples, situés dans un seul plan passant par son axe : ce système détermine un moment de fléchissement qui courbe le corps et la déformation est appelée flèche. Exemple : la planche d'un plongeoir ou le madrier formant pont entre les deux bords d'une tranchée (V. fig. I-2) sont sollicités à la flexion.

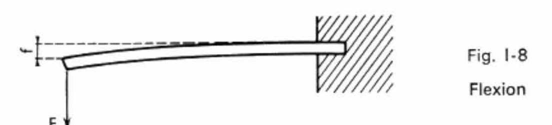


Fig. I-8
Flexion

CHAPITRE II

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

1. ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Pour chaque sollicitation simple, il existe un essai particulier, réalisé sur une éprouvette du matériau considéré. L'éprouvette est soumise à des charges que l'on fait croître progressivement et l'on mesure les déformations correspondantes : allongement, raccourcissement, glissement, angle de torsion ou flèche.

Tant que l'éprouvette reprend sa forme initiale dès que la force cesse d'être appliquée, les déformations sont temporaires et élastiques. Au contraire, s'il reste une déformation après la cessation de l'effort, la déformation est permanente.

L'essai de traction est le plus important car, outre les renseignements qu'il fournit sur la manière dont le matériau réagit à cette sollicitation, il permet de déterminer d'autres caractéristiques en rapport avec la résistance à l'extension, par exemple la dureté.

2. ESSAI DE TRACTION

Pour les métaux, l'éprouvette est définie par la norme PN A 03-151 (fig. II-1). La partie médiane, lisse et bien calibrée, porte deux repères A et B distants de 100 mm qui définissent la longueur initiale L de l'éprouvette. La section S est de 150 mm². Les extrémités sont prises dans les mâchoires de la machine de traction, qui comporte un mécanisme enregistreur. À la fin de l'essai, la partie centrale s'amincit : le phénomène est appelé striction. Puis la rupture se produit.

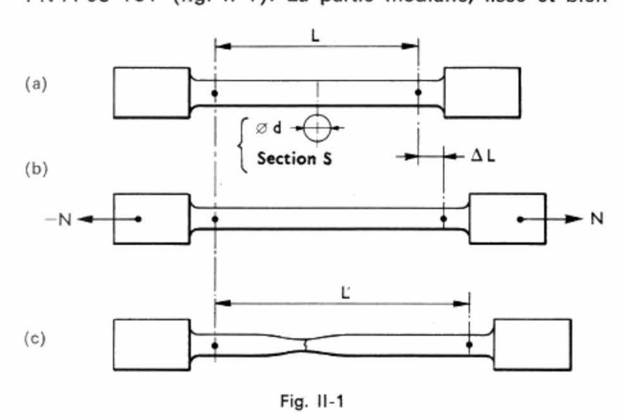


Fig. II-1

Éprouvette : a) initialement ; b) en cours d'essai ; c) après rupture

Le diagramme enregistré (fig. II-2) montre les variations de l'allongement ΔL en fonction de la charge :

1° La partie rectiligne OA correspond à une période où les allongements, extrêmement petits, sont directement proportionnels aux charges appliquées. C'est la période des déformations élastiques.

La contrainte de traction n, dans l'éprouvette, est alors donnée par la relation (V. chap. 3, § 1) :

$$n = \frac{N}{S}$$

si l'on appelle n la contrainte, N la charge normale à la section, et S la section initiale de l'éprouvette. La contrainte à la limite d'élasticité, ou *limite élastique* R_e, est égale à la charge correspondant au point A divisée par la section de l'éprouvette :

$$R_e = \frac{N_A}{S}$$

2° La partie ABC du diagramme, dont la forme varie suivant la nature et l'état du matériau essayé, correspond à une période plastique de grands allongements. Au cours de cette période, si l'effort de traction est supprimé, l'éprouvette ne reprend plus sa longueur initiale. La déformation subie est permanente.

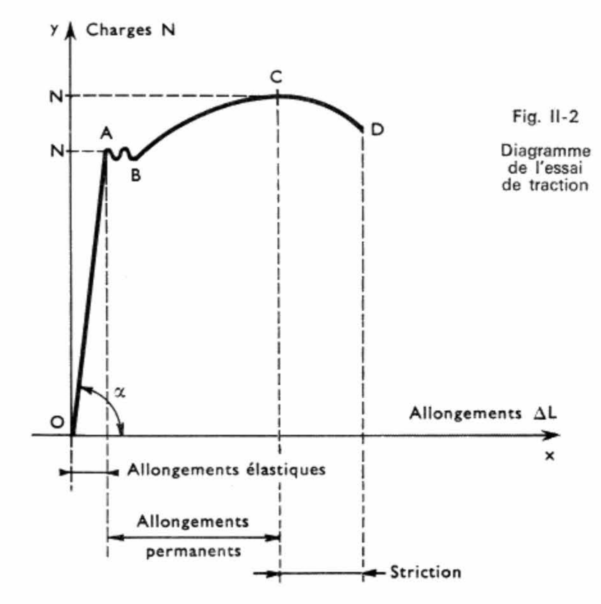


Fig. II-2

Diagramme de l'essai de traction

3° En C, la striction commence et elle s'accentue jusqu'à la rupture, qui correspond au point D. La charge correspondant au point C est la charge maximale que peut supporter l'éprouvette. On en déduit que la contrainte maximale que le matériau peut supporter sans rupture, ou *résistance à la rupture R*, est égale au quotient de cette charge maximale et de la section initiale de l'éprouvette :

$$R = \frac{N_C}{S}$$

L'allongement total, subi par l'éprouvette jusqu'à sa rupture, est mesuré par la différence $L' - L$. On appelle *coefficient d'allongement* A %, cet allongement, mesuré après rupture, rapporté à la longueur initiale L :

$$A\,\% = \frac{L' - L}{L} \times 100$$

3. LOI DE HOOKE

Sur le diagramme de l'essai de traction (V. fig. II-2), dans la partie OA, au début de l'action de la force N, l'allongement est directement proportionnel à la force appliquée.

Pendant cette période les déformations élastiques sont donc proportionnelles aux contraintes ; c'est la *loi de Hooke* qui s'exprime par la relation :

$$n = E \cdot i$$

dans laquelle : i est l'allongement unitaire à un instant déterminé, et E est un coefficient (il est défini ci-après).

L'allongement ΔL, pour une longueur initiale L, est alors :

$$\Delta L = iL \quad \text{ou} \quad \Delta L = \frac{nL}{E}$$

et par suite : $$\Delta L = \frac{NL}{ES}$$

Sur les diagrammes enregistrés pour des matériaux différents, nous constatons que la pente de la droite OA n'est pas la même ; son coefficient angulaire est défini par le rapport :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n}{i} = E$$

E est appelé module d'élasticité longitudinale du matériau (ou module de Young).

Ce module est une caractéristique mécanique très importante, qui indique la rigidité du matériau, c'est-à-dire sa capacité de résistance à la déformation pour une valeur déterminée de la contrainte. C'est donc un élément essentiel du choix du matériau (cas de la flexion).

Inversement, l'emploi de matériaux à faible module d'élasticité, tels que les alliages d'aluminium, impose l'utilisation de formes de pièce différentes de celles utilisées avec des matériaux à grand module d'élasticité, tels que les aciers, et il faudra pousser plus loin l'étude de la répartition de la matière dans les sections (influence du nervurage, par exemple.)

Les modules d'élasticité longitudinale des métaux sont donnés ci-après en décanewtons par millimètre carré (V. également § 4).

Métal	Module d'élasticité longitudinale
Tungstène	42 000
Glucinium	36 000
Nickel	22 000
Aciers	17 000 à 28 000
Aciers de construction	20 000 à 22 000
Fer	18 000 à 20 000
Platine	16 000
Cuivre	12 600
Titane	10 500
Bronzes	10 000 à 12 000
Fontes	9 000 à 13 000
Laiton ordinaire	9 200
Zinc	8 000
Alliages d'aluminium	7 000 à 7 500
Magnésium	4 500
Étain	4 000
Calcium	2 000
Plomb	1 700

4. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

La limite élastique, la résistance à la rupture, le coefficient d'allongement et le module d'élasticité longitudinale sont les principales caractéristiques mécaniques d'un matériau.

Elles dépendent de la nature du matériau considéré, ainsi que de facteurs tels que : la composition chimique, le mode d'élaboration (moulage ou forgeage, par exemple), le traitement thermique ou mécanique et la température de l'essai.

En particulier, pour des éprouvettes prélevées dans la même barre, elles varient considérablement suivant les traitements thermique (recuit ou trempe et revenu) et mécanique (laminage à chaud, forgeage à chaud, forgeage à froid ou écrouissage) subis par chaque éprouvette.

Pour les matériaux courants, les caractéristiques mécaniques R, R_e et E sont données en décanewtons par millimètre carré dans le tableau ci-après.

5. CONDITION DE SÉCURITÉ

Théoriquement, pour que l'organe calculé soit stable, la contrainte ne doit pas dépasser la limite élastique R_e du matériau, donnée par l'essai de traction.

Pratiquement, dans le calcul des dimensions d'un organe de machine, il faut tenir compte, par prudence, d'un certain nombre d'incertitudes dans la connaissance des éléments suivants : charges que supporte l'organe en fonctionnement et mode d'application plus ou moins brusque de ces charges ; nature et caratéristiques mécaniques du matériau ; température réelle de fonctionnement ; contraintes réelles (du fait que l'organe s'éloigne souvent de la poutre idéale définie précédemment).

Aussi la *contrainte calculée* doit-elle être nettement inférieure à R_e et ne pas dépasser la *contrainte admissible,* encore appelée *résistance pratique,* qui est désignée par R_p.

La condition de sécurité est donc :

$$n \leqslant R_p \ll R_e$$

Matériau	Charge de rupture R		Limite élastique R_e		Module d'élasticité longitudinale E
	Traction	Compression	Traction	Compression	
Fonte ordinaire	12	75	7,5	15	10 000
Acier doux	35	35	20	20	20 000
Acier mi-dur recuit	60	60	36	36	21 000
Acier mi-dur trempé et revenu à 550 °C	80	80	62	62	21 000
Acier dur recuit	82	82	45	45	22 000
Acier dur trempé et revenu à 450 °C	160	160	135	135	22 000
Fer forgé	40	35	14	14	20 000
Fer (tôle recuite)	35	30	14	14	17 500
Fer (fil écroui)	65		42		20 000
Cuivre recuit	23	23	7	2,7	10 700
Cuivre (fil écroui)	42		30		12 600
Bronze ordinaire	26	26	13	13	11 000
Laiton recuit (tôle)	30	30	8,5	8,5	6 400
Laiton écroui (rond)	40	40	15	15	9 870
Aluminium recuit	9	9	4,5	4,5	6 700
Aluminium écroui	18	18	17	17	6 700
A-U4G forgé, trempé	42	42	28	28	7 200
A-S13 coulé	18	18	8	8	7 000
Titane (et alliages)	50 à 95	50 à 95	35 à 90	35 à 90	10 500
Magnésium recuit	15	15	6	6	4 500
AG-6Z3 coulé	16	16	10	10	4 300
AG-6Z1 forgé	28	28	20	20	4 500
Chêne (en long)	11	6,6	2,7	2 (1)	1 170
Chêne (en travers)	0,5	3,5			
Frêne (en long)	12	6,6	2,5		985
Hêtre (en long)	11,7	6,6	1,6		620
Pin (en long)	11,3	4,5	2,5		1 200
Briques	0,8	1			
Béton (ciment 250/315 : 400 kg/m³)	0,35	2,5	0,35 (2)	≈ 2,5	≈ 1 500
Granit		8		0,6	
Grès	0,6	2			
Maçonnerie		(3)			
Verre	2,5				7 000

(1) V. chap. 12, § 2.1
(2) V. chap. 12, § 3.1
(3) Environ les trois quarts de la charge de rupture de la pierre qui la constitue.

6. COEFFICIENT DE SÉCURITÉ

La contrainte admissible R_p est obtenue en divisant la limite élastique R_e par un nombre s appelé coefficient de sécurité :

$$R_p = \frac{R_e}{s}$$

Les règlements, établis par des organismes publics ou privés, fixent la valeur des coefficients de sécurité que l'on doit appliquer dans les différents types de constructions : construction métallique, chaudières, constructions navale et aéronautique, appareils de levage, etc. Ces valeurs sont généralement comprises entre 1,5 et 5, suivant le degré de précision avec lequel on connaît les charges appliquées, les contraintes réelles et les matériaux utilisés.

CHAPITRE III
EXTENSION ET COMPRESSION

1. EXTENSION

Une pièce, sollicitée par deux forces égales et directement opposées qui agissent vers l'extérieur, a tendance à s'allonger (fig. III-1). On dit que la pièce travaille à l'extension.

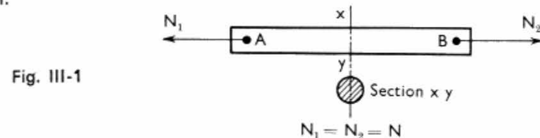


Fig. III-1

L'analyse de l'équilibre de la partie isolée de la pièce, située à droite de la section plane *xy*, montre que les sollicitations élémentaires agissant sur les éléments de la surface S de cette section ont pour résultante une force N agissant à gauche de la section et équivalente à N_1. Par ailleurs, l'extension étant la seule sollicitation, la pièce n'a pas tendance à se courber et, quand elle s'allonge, deux sections planes voisines s'écartent en restant parallèles entre elles. Par conséquent, la déformation du matériau et la sollicitation élémentaire par unité de surface, ou contrainte n, sont constantes dans la section *xy* et normales à celle-ci.

La force N a donc pour valeur :

$$N = n.S, \qquad \text{d'où :} \qquad n = \frac{N}{S}$$

et la *condition de sécurité* est pour chaque section :

$$n \leqslant R_{pt}, \quad \text{ou :} \quad N \leqslant S.R_{pt}$$

On exprime N en décanewtons, S en millimètres carrés et R_{pt} en décanewtons par millimètre carré ; R_{pt} est la contrainte admissible à l'extension, dont la valeur, fonction du coefficient de sécurité adopté pour calculer les dimensions de la pièce, a été définie ci-dessus.

2. COMPRESSION

Si deux forces égales et directement opposées agissent vers l'intérieur (fig. III-2), la pièce travaille à la compression et a tendance à se raccourcir.

N_1 N_2

$N_1 = N_2 = N$

Fig. III-2

La rupture par compression simple ou écrasement, n'existe que si la pièce a une faible longueur par rapport à ses dimensions transversales. D'où deux cas de pièces comprimées :

2.1. Pièce courte. — Dans ce cas, on retrouve les mêmes phénomènes. Le diagramme de compression est identique au diagramme de traction et E a la même valeur. Pour quelques matériaux, R_e diffère et la contrainte admissible à la compression R_{pc} est égale à R_{pt}.

Pendant la période de déformation élastique, la loi de Hooke, proportionnalité entre les contraintes et les raccourcissements unitaires est applicable, les sections planes restent parallèles entre elles et la condition de sécurité est pour chaque section :

$$n \leqslant R_{pc}, \quad \text{ou :} \quad N \leqslant S.R_{pc}$$

Le problème de la résistance à la compression trouve son application : dans les piliers en maçonnerie de dimensions usuelles ; dans les colonnes en fonte dont la longueur est inférieure à huit fois la plus petite des dimensions transversales.

2.2. Pièce longue. — Sous une charge inférieure à la charge de rupture (et parfois à la charge de limite élastique) d'une pièce courte de même section S, la pièce se courbe et se rompt par une flexion latérale, appelée flambage, dont l'étude sera faite plus loin (V. chap. 8).

3. CONTRAINTES ADMISSIBLES (R_p)

Pour des pièces immobiles soumises à des efforts constants, les valeurs suivantes sont généralement adoptées :

Matériau	Contrainte admissible (décanewtons par millimètre carré)	
	Traction R_{pt}	Compression R_{pc}
Fonte	2	10
Fer forgé	7	5
Acier doux	12	12
Acier mi-dur recuit	18	18
Maçonnerie	0	0,1
Béton non armé	0,02	0,2
Béton armé	0,1	0,8
Chêne	1,3	1,1
Bois résineux	1,2	1

Remarque : Les valeurs des contraintes admissibles pour des pièces en mouvement, ou sollicitées par des efforts dynamiques, sont inférieures à celles indiquées. Les chocs, les à-coups, les variations de direction, d'intensité ou de sens des efforts fatiguent le matériau et imposent un coefficient de sécurité plus grand. De même, la température influe beaucoup : pour les aciers ordinaires, R_e diminue dès 120 °C et est pratiquement nulle à 500 °C.

4. APPLICATIONS NUMÉRIQUES

Exemple 1. — Une tige verticale en acier mi-dur subit un effort de traction de 4 000 daN : la résistance à la rupture de l'acier est de 60 daN/mm² et sa résistance pratique de 18 daN/mm². Quel diamètre doit avoir cette tige ?

On désigne par S la section de la tige en millimètres carrés et on applique la formule : $N \leqslant S.R_{pt}$; on doit avoir :

$$4\,000 \leqslant 18\,S$$

soit : $S \geqslant \frac{4\,000}{18}$, ou : $S \geqslant 222$ mm²

d'où : $d \geqslant 16{,}8$ mm ;

on adoptera : $d = 18$ mm, soit : $S = 254$ mm².

Exemple 2. — Quelle charge *limite* peut-on appliquer à cette tige sans déformation permanente ?

Pour cela, il faut que la contrainte reste inférieure à la limite élastique de l'acier mi-dur qui est de 36 daN/mm²:

$n \leqslant 36$ daN/mm², soit : $\frac{N}{S} \leqslant 36$, ou : $N \leqslant 36\,S = 36 \times 254$,

d'où : $N \leqslant 9\ 144$ daN.

Cette valeur est une limite que l'effort, statique ou dynamique, ne doit jamais atteindre.

Exemple 3. — Quelle charge *pratique* peut-on appliquer à cette tige, *sans risque* de déformation permanente ?

La contrainte admissible pour l'acier mi-dur est de 18 daN/mm²: $n = 18$ daN/mm², soit : $\frac{N}{S} = 18$, ou : $N = 18\,S = 18 \times 254$, d'où : $N = 4\ 572$ daN.

Exemple 4. — Cette tige a une longueur de 0,7 mètre, quel est son allongement sous la charge prévue del 4 000 daN ?

La charge limite sans déformation permanente de cette tige est de 9 144 daN, la charge prévue la fait donc travailler dans la zone de déformation élastique et la loi de Hooke est applicable ; l'allongement unitaire *i*, ou allongement par unité de longueur, est : $i = \frac{n}{E}$. *E*, le module d'élasticité de l'acier mi-dur est de 21 000 daN/mm² et la contrainte dans la tige est : $n = \frac{N}{S}$, ou : $n = \frac{4\ 000}{254}$, soit $n = 15{,}7$ daN/mm².

$$\text{D'où : } \frac{\Delta L}{L} = \frac{15{,}7}{21\ 000} = 0{,}000\ 750, \text{ ou :}$$

$\Delta L = 0{,}000\ 750\ L$ et, en millimètres : $\Delta L = 0{,}000\ 750 \times 700$, soit : $\Delta L \approx 0{,}5$ mm.

Exemple 5. — Pour quelle charge la rupture de cette tige se produira-t-elle en traction ?

La charge de rupture de l'acier mi-dur est de 60 daN/mm², et la rupture de la tige se produira pour $N \geqslant S.R$, ou : $N \geqslant 254 \times 60$, soit : $N \geqslant 15\ 240$ daN.

Exemple 6. — Quel doit être le diamètre et quelle peut être la hauteur des 6 colonnettes cylindriques pleines, en fonte, qui supportent un silo de masse 420 t ?

La charge par colonnette est : $N = 420\ 000/6$, soit : $N = 70\ 000$ daN et la contrainte admissible en compression pour la fonte : $R_{pc} = 10$ daN/mm² ; d'où : $N \leqslant S.R_{pc}$, ou : $70\ 000 \leqslant 10\,S$, soit : $S \geqslant 7\ 000$ mm², et $d \geqslant 93{,}5$ mm.

On adoptera $d = 100$ mm, et pour être dans les conditions de compression sans risque de flambage, c'est-à-dire $L \leqslant 5\,d$, on limitera la hauteur à 400 mm.

5. PAROIS CYLINDRIQUES MINCES

Les parois cylindriques minces des réservoirs, des chaudières ou des conduites supportent une pression effective intérieure ou extérieure et ne sont pratiquement sollicitées qu'à la traction ou à la compression : elles constituent un cas important du calcul des organes soumis à l'extension et à la compression.

Les cas de pression effective extérieure sont les moins courants : simples tuyaux d'écoulement enterrés supportant la charge de la terre ou tuyaux soumis à la pression atmosphérique et où règne le vide.

Dans le cas général, un fluide sous pression (eau, huile, vapeur, gaz, etc.) exerce une pression intérieure élevée sur la paroi : pour calculer l'épaisseur de cette paroi, on ne tient pas compte de la pression atmosphérique extérieure qui est négligeable par rapport à la pression intérieure.

5.1. Contrainte transversale.

— Dans une conduite constituée par une paroi cylindrique d'épaisseur *e* et de diamètre intérieur *D*, soumise à une pression intérieure *p* (fig. III-3), on isole un élément *ACB'* limité par une section diamétrale *AB'* et de longueur *L*. On démontre que la résultante *N* des efforts extérieurs dus à la pression est égale à : $N = p.D.L$. Par ailleurs les efforts intérieurs, qui maintiennent l'élément isolé en équilibre, résultent de la contrainte *uniforme* de traction existant dans les deux sections *A'A* et *BB'*, de largeur *e* et de longueur *L*, soit : $N = 2\,n.e.L$.

Et : $p.D = 2\,n.e$, d'où la contrainte : $n = \frac{p.D}{2\,e}$.

La condition de sécurité : $n \leqslant R_{pt}$, s'écrit alors :

$$\frac{p.D}{2\,e} \leqslant R_{pt}, \quad \text{ou : } e \geqslant \frac{p.D}{2\,R_{pt}}$$

Pratiquement on adopte la formule (avec *e* et *D* millimètres, *p* et R_{pt} étant exprimés avec la même unité) :

$$e = \frac{pD}{2\,R_{pt}} + \alpha$$

La surépaisseur α tient compte des défauts éventuels de la paroi, et aussi de sa diminution dans le temps par l'usure et par la corrosion. On adopte pour α les valeurs suivantes : 1 à 2 pour l'acier ; 5 à 6 pour la fonte ; 3 pour le cuivre.

Remarque : Si la pression extérieure n'est pas négligeable, la formule précédente devient :

$$e = \frac{(p_i - p_e)\ D}{2\ R_{pt}} + \alpha$$

dans laquelle : p_i est la pression intérieure ; p_e, la pression extérieure ; $p_i - p_e$, la pression effective.

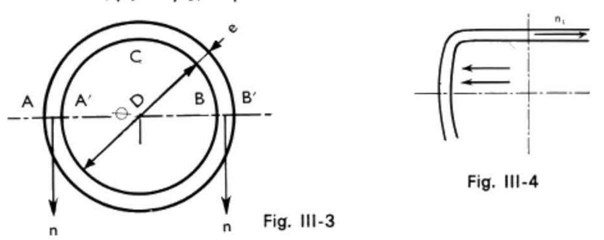


Fig. III-3

Fig. III-4

5.2. Contrainte longitudinale.

— La paroi d'un réservoir cylindrique, par suite de la poussée sur les fonds, est soumise à une contrainte longidudinale n_1 (fig. III-4) parallèle à l'axe de la virole. On démontre par le calcul que cette contrainte longitudinale n_1 est égale à la moitié de la contrainte transversale n : $n_1 = \frac{n}{2}$. Pour déterminer l'épaisseur de la paroi il suffira donc de faire le calcul de *n*, puisque n_1 lui est toujours inférieure.

6. PAROIS CYLINDRIQUES ÉPAISSES

On vient de traiter les cas de réservoirs à paroi de faible épaisseur : les formules utilisées ne font état que du diamètre intérieur. Si les parois ont une épaisseur importante (conduites forcées d'alimentation de turbines, pots de presse hydraulique, vérins haute pression, canons, etc.), on doit faire intervenir les diamètres intérieur et extérieur de l'enveloppe car l'hypothèse de la répartition uniforme des contraintes dans la section diamétrale *AB'* (V. fig. III-3), qui a servi à établir les formules, n'est plus valable. On applique alors d'autres formules, établies grâce à la théorie générale de l'élasticité et appelées *formules de Lamé*, qui permettent de déterminer pour chaque point les contraintes suivant une direction radiale et suivant une direction tangentielle, en fonction des pressions qui agissent sur la paroi et des diamètres intérieur et extérieur de celle-ci (fig. III-5).

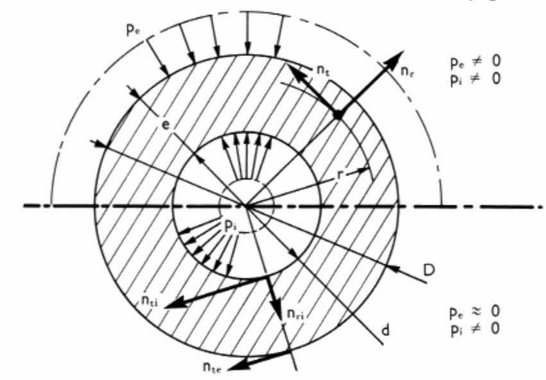


Fig. III-5 — Parois cylindriques épaisses

6.1. Formules de Lamé

1° Contrainte suivant une direction radiale:

$$n_r = \frac{p_e D^2 - p_i d^2}{D^2 - d^2} + (p_i - p_e)\frac{D^2 d^2}{D^2 - d^2}\frac{1}{4r^2}$$

2° Contrainte suivant une direction tangentielle:

$$n_t = \frac{p_e D^2 - p_i d^2}{D^2 - d^2} - (p_i - p_e)\frac{D^2 d^2}{D^2 - d^2}\frac{1}{4r^2}$$

Cette contrainte tangentielle est une traction si n_t est négatif et une compression si n_t est positif.

Dans ces formules: p_e est la pression extérieure, p_i la pression intérieure, D le diamètre extérieur de la paroi, d le diamètre intérieur de la paroi, r le rayon sur lequel se trouve le point dont on calcule la contrainte ($d \leqslant 2r \leqslant D$).

6.2. Formules simplifiées. — Dans le cas le plus fréquent, la pression extérieure est négligeable par rapport à la pression intérieure: on admet donc que $p_e = 0$ et les formules se mettent sous les formes approchées ci-après.

1° Contraintes au diamètre extérieur:

$$n_{re} = p_e = 0$$

$$n_{te} = -p_i \frac{2\,d^2}{D^2 - d^2}$$

2° Contraintes au diamètre intérieur:

$$n_{ri} = p_i$$

$$n_{ti} = -p_i \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2}$$

6.3. Calcul de l'épaisseur. — La contrainte au diamètre extérieur est inférieure à la contrainte au diamètre intérieur, il suffit donc que cette dernière soit plus petite que la contrainte admissible R_p, soit en valeur absolue: $|n_{ti}| \leqslant R_p$. En écrivant: $D = d + 2e$, l'épaisseur e est donnée par la formule:

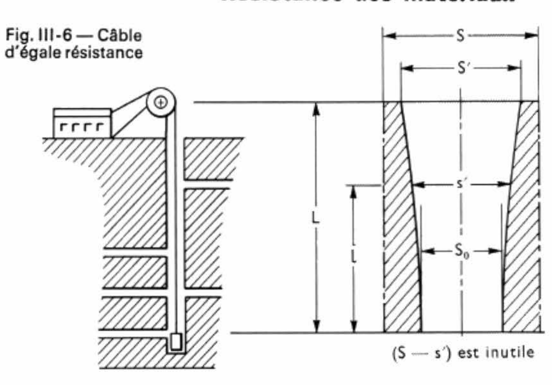
$$e \geqslant \frac{d}{2}\left(\sqrt{\frac{R_p + p_i}{R_p - p_i}} - 1\right)$$

7. CÂBLE D'ÉGALE RÉSISTANCE

Dans les applications numériques précédentes (V. § 4), on n'a pas tenu compte du poids de la tige pour calculer sa section: cette approximation est toujours justifiée en extension et en compression, où le poids propre est pratiquement négligeable par rapport à la charge extérieure.

Exceptionnellement, dans le cas d'un câble de grande longueur (câble d'ascenseur de puits de mine, par exemple), le poids du câble doit intervenir dans le calcul de sa section supérieure. Ainsi (fig. III-6), pour un câble de longueur L et de *section constante* S, en acier de contrainte admissible

Fig. III-6 — Câble d'égale résistance



R_{pt} et de poids volumique ρg, soulevant une charge N, la section supérieure doit être telle que:

$$S.R_{pt} \geqslant N + \rho g\,LS, \text{ ou: } S \geqslant \frac{N}{(R_{pt} - \rho g\,L)}$$

La contrainte dans la section inférieure est alors: $n = \frac{N}{S}$, ou: $n \leqslant R_{pt} - \rho g\,L$, et, comme L est grand, cette valeur est nettement plus petite que R_{pt}. Or, pour respecter la condition de sécurité $n_0 \leqslant R_{pt}$, il suffirait d'une section inférieure de valeur: $S_0 = \frac{N}{R_{pt}}$. Une partie importante, $S - S_0$, de la section inférieure est donc inutile. Et il en est de même pour toutes les sections, $S - s'$ décroissant en remontant vers la section supérieure.

Aussi, pour éviter le poids inutile du câble de section constante, fabrique-t-on un câble de très grande longueur avec un diamètre croissant, de bas en haut, tel que la contrainte ait la même valeur n_0 ($n_0 = R_{pt}$) dans toutes ses sections: un tel câble est appelé *câble d'égale résistance à l'extension*. La loi de variation de ses sections est:

$s' = S_0 . \mathbf{e}^{\frac{\rho g\,l}{R_{pt}}}$, avec l distance de la section s' considérée à la section inférieure; sa section supérieure a pour valeur: $S' = S_0 . \mathbf{e}^{\frac{\rho g\,L}{R_{pt}}}$.

Exemple. — Pour $R_{pt} = 15$ daN/mm² et $L = 1\,000$ m, avec $\rho g = 7{,}8$ daN/dm³, on trouve: $n = 7{,}2$ daN/mm²; $\frac{(S - S_0)}{S} = 0{,}52$, soit 52 % de section inférieure inutile; poids du câble de section constante: $P = 1{,}08\,N$, donc supérieur à la charge à soulever. Pour le câble d'égale résistance: $\frac{S'}{S_0} = 1{,}68$, au lieu de $\frac{S}{S_0} = 2{,}08$; $P' = 0{,}68\,N$, soit une économie de poids, par rapport au câble de section constante: $\frac{(P - P')}{P} = 0{,}37$ ou 37 %.

CHAPITRE IV
CISAILLEMENT SIMPLE

1. DÉFINITION

Un organe est sollicité au cisaillement simple lorsque les forces extérieures qui lui sont appliquées se réduisent à deux forces qui tendent à le séparer en deux tronçons, qu'elles font glisser l'un par rapport à l'autre suivant le plan d'une section xy (fig. IV-1).

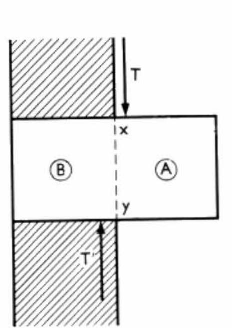


Fig. IV-1

Cisaillement
xy: section cisaillée

2. CONDITION DE SÉCURITÉ

Dans ce cas du cisaillement simple, les forces extérieures se réduisent aux composantes T et T' tangentielles à la section xy.

La contrainte tangentielle correspondante t, dans la section xy, a pour valeur : $t = \frac{T}{S}$, S étant la section de la pièce.

La condition de sécurité sera : $t \leqslant R_{pg}$, où : R_{pg} est la résistance pratique au cisaillement du matériau considéré.

Remarques :

1° Les essais de cisaillement, effectués dans les laboratoires de résistance des matériaux, ont montré que pour les métaux fibreux comme l'acier, la résistance à la rupture par glissement est sensiblement égale à la moitié de la résistance à la rupture par traction : $R_g = \frac{R}{2}$. Pour les métaux à structure granuleuse, comme la fonte : $R_g = R$.

2° La limite d'élasticité par glissement des aciers courants est sensiblement égale à la moitié de la limite d'élasticité à la traction : $R_{eg} = \frac{R_e}{2}$; tandis que pour la fonte, elle est : $R_{eg} = R_e$.

3° Le cisaillement simple et la répartition uniforme de la contrainte t n'existent que si la flexion, qui a tendance à accompagner le cisaillement, est interdite par les liaisons de la pièce cisaillée (pression des serre-flancs de part et d'autre des lames d'une cisaille ou pression de l'ajustement serré des rivets). Sinon, t n'est pas uniforme et le calcul au cisaillement simple constitue une approximation dont le coefficient de sécurité doit tenir compte (V. chap. V, § 3).

3. DÉFORMATION DE CISAILLEMENT

Soit CD la section de la pièce à l'encastrement (fig. IV-2), EG une section très voisine, située à la distance Δx de celle-ci, et dont le plan est celui de la composante tangentielle T, appelée aussi effort tranchant. Après déformation, la section EG vient en FH. Le glissement transversal, dû au cisaillement, est représenté par le segment EF. On appelle déviation le rapport $\frac{EF}{\Delta x}$. On peut caractériser la déviation par l'angle γ.

La déformation étant élastique, le glissement est très faible. Si γ est exprimé en radians, on peut écrire :

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma = \frac{EF}{\Delta x}$$

Les essais de cisaillement permettent d'établir que la déviation γ est proportionnelle à l'effort tranchant T, inversement proportionnelle à la section S et, qu'en outre, le coefficient de proportionnalité dépend de la nature du matériau.

En conclusion, l'expression de la déviation est la suivante :

$$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \frac{T}{S} \qquad (1)$$

Unités : on exprime γ en radians, T en décanewtons, S en millimètres carrés et G, *module d'élasticité transversale du matériau* (ou module de Coulomb), en décanewtons par millimètre carré. Pour les aciers : $G = 0{,}4\,E$; par exemple, si le module d'élasticité longitudinale d'un acier est $E = 20\,000$ daN/mm², son module d'élasticité transversale est : $G = 0{,}4 \times 20\,000 = 8\,000$ daN/mm².

Remarque : L'expression (1) peut aussi se mettre sous la forme suivante :

$$\gamma = \frac{t}{G} \text{ ou : } t = G \cdot \gamma \left(\text{avec : } t = \frac{T}{S}\right)$$

Cette dernière, qui montre que la contrainte tangentielle t est proportionnelle au module d'élasticité transversale et à la déviation, est analogue à la formule d'extension et de compression : $n = E \cdot i$ (loi de Hooke).

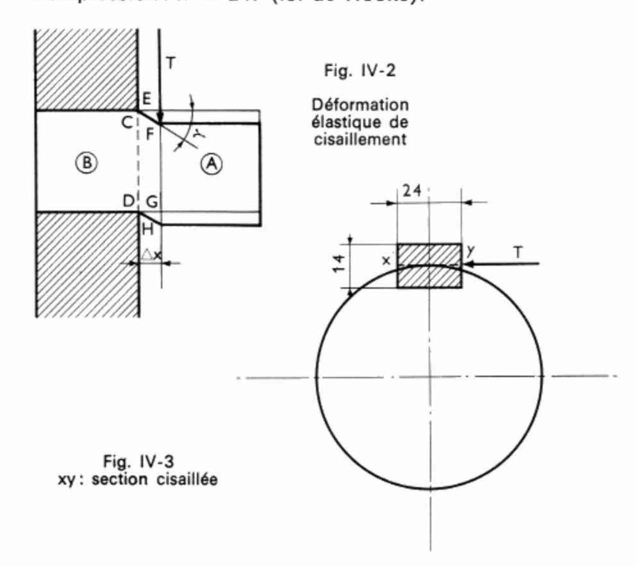


Fig. IV-2
Déformation élastique de cisaillement

Fig. IV-3
xy : section cisaillée

4. APPLICATION NUMÉRIQUE

Calcul d'une clavette longitudinale (fig. IV-3). Un moteur transmet un couple de 160 daN . m ou m ∧ daN (V. t. 1, Préliminaires). L'arbre, en acier mi-dur ($R_{pt} = 18$ daN/mm²), a un diamètre de 80 mm. La clavette longitudinale a une section de 24 × 14 mm² et une longueur de 50 mm. On désire calculer la contrainte tangentielle de cisaillement dans la section cisaillée xy de la clavette.

Solution : valeur de l'effort tangentiel sur l'arbre $T = \frac{C}{r}$. C est le couple transmis (en décanewtons-mètres), r, le rayon de l'arbre (en mètres). On trouve pour T :

$$T = \frac{160}{0{,}04} = 4\,000 \text{ daN}$$

Section cisaillée de la clavette :

$$S = 24 \times 50 = 1\,200 \text{ mm}^2$$

Contrainte tangentielle correspondante :

$$t = \frac{T}{S} = \frac{4\,000}{1\,200} = 3{,}3 \text{ daN/mm}^2$$

Or, pour l'acier mi-dur, la résistance pratique au cisaillement est $R_{pg} = 9$ daN/mm². La condition de sécurité au cisaillement : $t \leqslant R_{pg}$ est donc largement assurée.

CHAPITRE V

FLEXION PLANE SIMPLE

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Définition. — Une poutre, chargée à une extrémité (fig. V-1) ou entre les appuis (fig. V-2), prend une déformation élastique désignée sous le nom de flèche. On dit que la poutre est sollicitée à la flexion.

1.2. Hypothèses adoptées pour les calculs. — L'étude mathématique de la *flexion plane simple* repose sur les hypothèses de base suivantes.

1° L'organe fléchi est assimilé à une poutre (V. chap. 1, § 2), qui repose sur deux appuis, ou qui est encastrée à une extrémité, ou à ses deux extrémités.

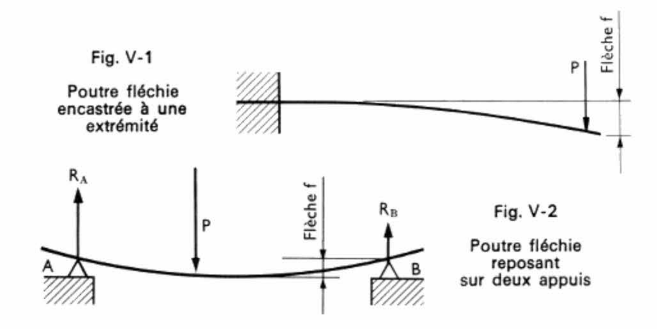


Fig. V-1
Poutre fléchie encastrée à une extrémité

Fig. V-2
Poutre fléchie reposant sur deux appuis

2° La poutre a un plan de symétrie qui contient les appuis (ce plan est vertical dans la majorité des cas) ; son axe est rectiligne avant déformation et sa section constante.

3° La poutre est constituée par des fibres jointives, parallèles à son axe longitudinal (fig. V-3).

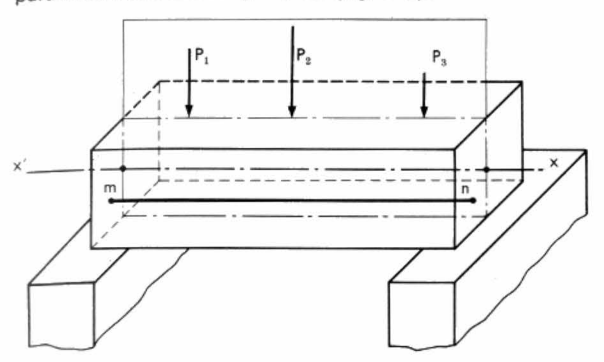


Fig. V-3 — x'x : axe longitudinal de la poutre ; mn : fibre de matière parallèle à l'axe

4° Les forces extérieures appliquées (charges et réactions des appuis) sont perpendiculaires à l'axe de la poutre et elles doivent avoir des droites d'action situées dans le plan de symétrie de la pièce (flexion plane, V. fig. V-3).

5° Les déformations sont très petites et elles ne modifient ni les directions des forces ni leurs distances respectives.

6° Une fibre *mn*, située initialement dans un plan parallèle au plan de symétrie (V. fig. V-3), reste dans le même plan après déformation ; en particulier, l'axe *x'x* de la poutre déformée est une courbe plane située dans le plan de symétrie ; c'est pourquoi la flexion est dite plane.

7° Toute section plane *MNPQ* (fig. V-4), initialement perpendiculaire à l'axe de la poutre, reste plane et perpendiculaire à l'axe après déformation.

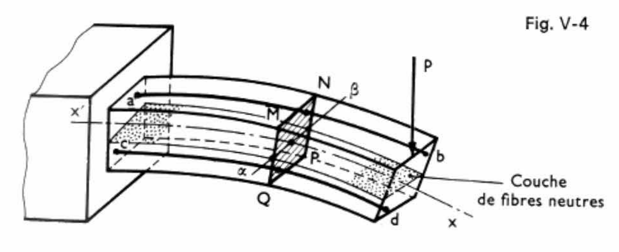


Fig. V-4

αβ : axe neutre de la section MNPQ ; ab : fibre tendue ; cd : fibre comprimée

1.3. Répartition des contraintes.

— Sous l'action de la charge *P*, la poutre fléchit (V. fig. V-4). Dans la partie supérieure convexe, les fibres longitudinales telles que *ab* sont tendues et s'allongent. Au contraire, dans la partie concave les fibres telles que *cd* sont comprimées et se raccourcissent. Par conséquent, il existe une couche de fibres qui ne sont ni tendues ni comprimées. Cette couche contient l'axe *x'x* de la poutre et est appelée *couche des fibres neutres :* la contrainte y est nulle au cours de la déformation. L'axe αβ, intersection de la section droite *MNPQ* avec la couche des fibres neutres, est dénommé *axe neutre* de la section.

1.4. Essai de flexion plane simple

1° Un barreau repose sur deux appuis dont la distance est constante (fig. V-5). Une charge progressive *P* est appliquée au milieu du barreau. La flèche qui correspond à la charge est amplifiée, par un dispositif approprié, et enregistrée. Le diagramme montre la variation de la flèche en fonction de la charge. La dimension des barreaux soumis aux essais et la longueur entre les appuis sont normalisées.

2° De même que pendant l'essai de traction, on observe plusieurs périodes : a) période des déformations

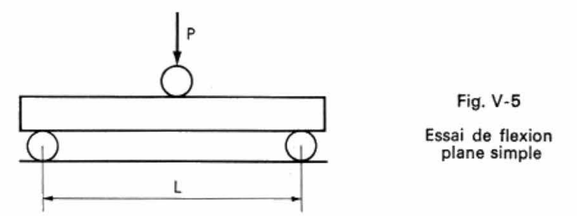


Fig. V-5
Essai de flexion plane simple

élastiques, au cours de laquelle la flèche est proportionnelle à la charge appliquée ; b) période des déformations permanentes, dès que la limite élastique du matériau est dépassée ; c) moment de la rupture, qui se produit rapidement, par flexion, au milieu du barreau.

1.5. Autres types de flexion.

— Quand toutes les hypothèses précédentes sont satisfaites, excepté l'une des deux hypothèses concernant les forces (V. § 1.2 4°), d'autres sollicitations s'ajoutent à la flexion et on est en présence : soit de *flexion plane composée* (forces dans le plan de symétrie et non perpendiculaires à l'axe : flexion et compression, ou flexion et extension ; forces perpendiculaires à l'axe, hors du plan de symétrie et parallèles à ce plan : flexion et torsion), soit de *flexion déviée simple* (forces perpendiculaires à l'axe, hors du plan de symétrie et passant par l'axe).

Enfin, si aucune de ces deux hypothèses n'est satisfaite, on est en présence de *flexion déviée composée* (forces passant par l'axe : flexion déviée et compression ou flexion déviée et extension ; forces dans un plan perpendiculaire à l'axe : flexion déviée et torsion ; forces quelconques, cas le plus général : flexion déviée et compression, ou extension, et torsion).

On étudiera ces types complexes de flexion au chapitre 7 : *le présent chapitre traite exclusivement le cas de la flexion plane simple.*

2. DÉTERMINATION DES CONTRAINTES

La poutre représentée est en équilibre sous l'action des forces extérieures F_1, F_2, F_3,..., F_n qui lui sont appliquées (fig. V-6). On suppose que les hypothèses relatives aux forces et à la poutre (§ 1.2) sont réalisées. Les forces sont donc dans le plan de symétrie, ou symétriques deux à deux par rapport à ce plan. En raison de cette symétrie, il n'y a pas de torsion. Elles sont aussi perpendiculaires à l'axe *x'x* de la poutre et il n'y a pas d'effort résultant normal à la section *ABCD*.

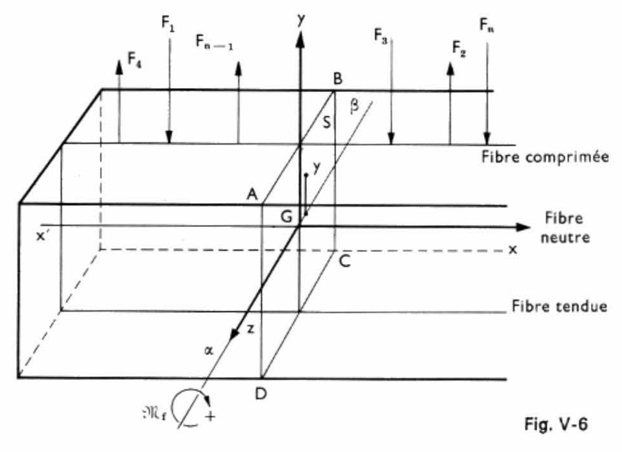


Fig. V-6

2.1. Réduction des forces appliquées.

— Dans une section *ABCD*, de surface *S*, perpendiculaire à l'axe longitudinal *x'x* et de centre de gravité *G*, la pièce est soumise :

1° À un effort tranchant résultant $T = \Sigma F_i$, qui est la somme des forces appliquées à gauche de la section affectées du signe + ou — suivant leur sens : il s'agit donc d'une somme algébrique.

2° À un moment fléchissant résultant :

$$\mathcal{M}_f = \Sigma \mathcal{M}_{Gz}(F_i)$$

qui est la somme des moments des forces appliquées à gauche de la section par rapport à l'axe neutre *Gz* ; cet axe situé dans le plan de la section est perpendiculaire à *Gx* et à *Gy* : ces moments sont affectés du signe positif ou négatif suivant leur sens ; le moment fléchissant est variable d'une section à l'autre de la pièce.

2.2. Conventions de signes. — Pour *T* : la direction positive est choisie suivant *Gy*. Pour le moment fléchissant $\mathcal{M}_f$: il est positif lorsqu'un observateur, couché suivant *Gz* et regardant *Gy*, voit la section tourner autour de l'axe *Gz* dans le sens des aiguilles d'une montre sous l'action de $\mathcal{M}_f$. Sur les diagrammes, $\mathcal{M}_f > 0$ est représenté vers le bas (V. fig. V-12 et V-16).

2.3. Contraintes. — En un point d'une section déterminée, le signe positif correspondant au sens *Gy*, la contrainte tangentielle moyenne est égale à :

$$t_{\text{moy}} = \frac{T}{S}$$

La contrainte normale due à la flexion, pour une fibre située à la distance *y* de l'axe neutre $\alpha\beta$ ou *Gz*, a pour valeur :

$$n = \frac{\mathcal{M}_f . y}{I}$$

Cette contrainte est positive ou négative suivant le sens du moment fléchissant $\mathcal{M}_f$ correspondant et suivant le signe de *y* : *n* est positif dans le cas d'une compression ; *n* est négatif dans le cas d'une extension (avec les conventions de signes adoptées précédemment). I est le moment quadratique de la surface par rapport à l'axe *Gz* ou $\alpha\beta$, appelé encore moment d'inertie axial de la section, désigné par $I_{\alpha\beta}$ ou I_{Gz} et défini ci-après.

2.4. Moment quadratique d'une surface (fig. V-7). — On appelle *moment quadratique* d'un élément de surface *s* par rapport à un axe $\alpha\beta$, l'expression sr^2, où *r* est la distance de l'élément *s* à l'axe $\alpha\beta$. Le *moment quadratique* d'une surface plane donnée est égal à la somme des moments quadratiques des éléments de surface qui la composent, soit :

$$I_{\alpha\beta} = \Sigma sr^2$$

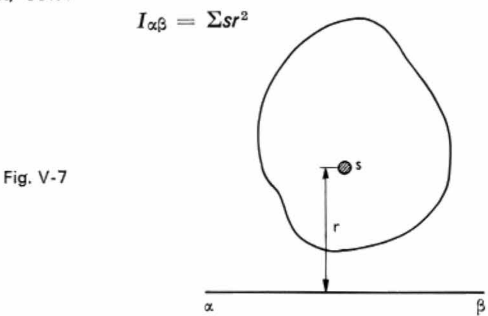


Fig. V-7

2.5. Axe neutre. — Comme on a pu le remarquer au cours de cette étude, la déformation est telle que les fibres de la pièce sont de moins en moins sollicitées à partir des fibres supérieures et inférieures. En se déplaçant le long de la section, on peut passer progressivement d'une compression à une extension ; de plus, les fibres inférieures sont tendues quand les fibres supérieures sont comprimées, et réciproquement. Il y a donc un point tel que la fibre qui y passe n'est ni comprimée ni tendue et pour lequel la contrainte est : $n = 0$. Dans la section considérée, tous les points, pour lesquels $n = 0$, sont sur une droite $\alpha\beta$ parallèle à *Gz* et appelée axe de flexion ou axe neutre. L'ensemble des axes de flexion constitue une surface de fibres dont la longueur reste invariable (ni comprimée, ni tendue).

Toutes les fibres à la même distance *y* de l'axe *Gz* (V. fig. V-6), qui est confondu avec l'axe neutre $\alpha\beta$ en flexion plane simple, supportent la même contrainte normale.

3. CONDITION DE SÉCURITÉ

Lorsque l'on passe d'une extrémité à l'autre de la poutre, il y a une section pour laquelle la contrainte est maximale ; or, *n* étant proportionnel à $\mathcal{M}_f$, la contrainte *n* sera donc maximale dans la section où $\mathcal{M}_f$ est lui-même maximal.

Lorsque l'on passe des fibres supérieures aux fibres inférieures, et si *v* est la distance maximale des fibres extérieures les plus éloignées de l'axe $\alpha\beta$, confondu avec *Gz* en flexion plane simple, la contrainte maximale dans la section dangereuse sera définie par la formule :

$$n_{\max} = \frac{\mathcal{M}_{f\max} . v}{I_{\alpha\beta}}$$

que l'on écrit généralement :

$$n_{\max} = \frac{\mathcal{M}_{f\max}}{\dfrac{I_{\alpha\beta}}{v}}$$

$\dfrac{I_{\alpha\beta}}{v}$ est appelé *module de flexion* et dépend des dimensions et de la forme de la section.

La *condition de sécurité* sera alors : contrainte tangentielle, $t \leqslant R_{pg}$; contrainte normale, $n_{\max} \leqslant R_{pt}$ (ou R_{pc}).

Remarque : Quand on calcule séparément les déformations élastiques, on constate que la contrainte tangentielle *t* est très faible par rapport à la contrainte normale *n*. Il en résulte que c'est la contrainte normale maximale, due au moment fléchissant $\mathcal{M}_{f\max}$, qui est la plus dangereuse et pratiquement la seule à considérer pour la condition de sécurité. Cependant, dans le cas de sections complexes comportant une *âme mince* (en particulier profilés métalliques du commerce, à section en I, H, U, L, T et Z), il est prudent de vérifier la condition de sécurité au cisaillement, car l'effort tranchant est pratiquement supporté par l'âme seule et la *contrainte réelle maximale correspondante*, vaut, si cette âme est rectangulaire et dans la section où *T* est maximal :

$$t_{\max} = \frac{3}{2}\, t_{\text{moy}} = \frac{3}{2}\, \frac{T_{\max}}{S'}$$

S' étant la surface de l'âme (soit S_2 pour la section de la figure V-11).

Par ailleurs, il faut noter que la condition de sécurité s'écrit en valeur absolue : le signe de $\mathcal{M}_{f\max}$ n'intervient pas.

4. DÉFORMATION DE FLEXION

4.1. Calcul de la déformation. — On considère un élément extrêmement petit d'une poutre soumise à la flexion (fig. V-8).

Soit *ABCD* cet élément de longueur Δl. Lorsque la poutre est soumise à une flexion, l'élément *ABCD* subit une déformation élastique et vient en *ABC'D'*.

Les deux triangles *OMN'* et *N'D'K* sont semblables, donc :

$$\frac{D'K}{N'M} = \frac{D'N'}{N'O}$$

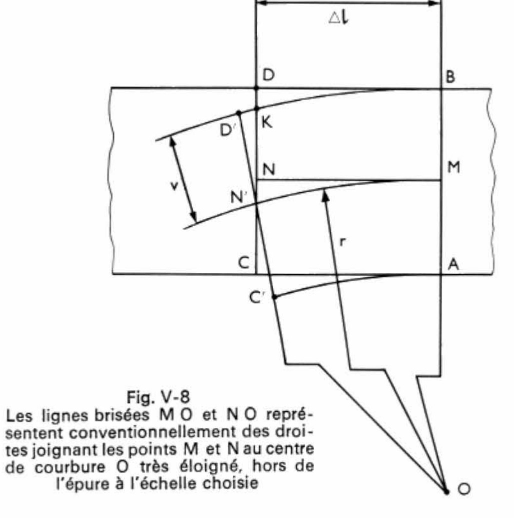


Fig. V-8
Les lignes brisées M O et N O représentent conventionnellement des droites joignant les points M et N au centre de courbure O très éloigné, hors de l'épure à l'échelle choisie

Or, $D'K$ est l'allongement de Δl après déformation, d'où : $D'K = i.\Delta l$; de plus: $N'M = \Delta l$; $D'N' = v$; et $N'O = r$, rayon de courbure local de la fibre neutre déformée. Par conséquent : $i = \dfrac{v}{r}$.

Par ailleurs : $i = \dfrac{n}{E}$, n étant la contrainte à laquelle est soumise la fibre BD', soit :

$$n = \frac{\mathcal{M}_f . v}{I_{\alpha\beta}}$$

D'où :

$$\frac{n}{E} = \frac{v}{r} = \frac{\mathcal{M}_f . v}{E . I_{\alpha\beta}}$$

Et :

$$\frac{1}{r} = \frac{\mathcal{M}_f}{E . I_{\alpha\beta}}$$

En outre, l'équation de la fibre neutre déformée correspond à une fonction $y = f(x)$ dans le système d'axes xy de référence et on démontre que le rayon de courbure r en un point d'abscisse x de cette courbe est tel que :

$$\frac{1}{r} = y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$$

avec : $r > 0$ si le centre de courbure O (V. fig. V-8) est au-dessus de la poutre, et : $r < 0$, s'il est en dessous.

On obtient ainsi l'équation différentielle :

$$y'' = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{r} = \frac{\mathcal{M}_f}{E . I_{\alpha\beta}}$$

On peut alors déterminer, par intégrations successives :

$$y' = \frac{dy}{dx} = \text{tg } \varphi \approx \varphi(x)$$

puis l'équation $y = f(x)$, et calculer la flèche maximale $f_{max}(x)$ (fig. V-9).

Les valeurs ainsi obtenues sont données dans le tableau B

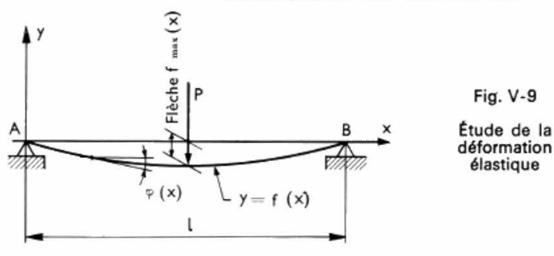


Fig. V-9
Étude de la déformation élastique

pour quelques cas de flexion usuels (V. § 6.3). On remarque qu'elles sont inversement proportionnelles à $I_{\alpha\beta}$ (V. § 7.2).

4.2. Condition de déformation. — Souvent la déformation d'une poutre doit être limitée. On exprime alors la flèche maximale admissible en *fraction* de la longueur l entre appuis de la poutre et on écrit la condition de déformation sous la forme :

$$f_{max} \leqslant \frac{l}{k}$$

On adopte généralement $k = 500$ pour des poutres supportant un plancher et $k = 1\,000$ pour des poutres supportant les rails d'une voie de pont roulant.

5. MOMENTS QUADRATIQUES

5.1. Sections usuelles. — Pour déterminer la section d'une pièce qui doit satisfaire à la condition de sécurité à la flexion, on calcule la valeur du moment quadratique $I_{\alpha\beta}$ de cette section. Il est donc utile de connaître la valeur des moments quadratiques des différentes formes de section par rapport à l'axe neutre $\alpha\beta$ passant par leur centre de gravité. Le tableau A ci-après, donne les valeurs de $I_{\alpha\beta}$ et de $\dfrac{I_{\alpha\beta}}{v}$ pour les sections les plus courantes, v étant la distance des points de la section les plus éloignés de l'axe $\alpha\beta$, points de la section où la contrainte n est maximale.

Tableau A

SECTIONS USUELLES

Moments quadratiques et modules de flexion

Section	Moment quadratique $I_{\alpha\beta}$	Module de flexion $\dfrac{I_{\alpha\beta}}{v}$
Triangle (α, β, G, 2/3 h, h/3, h, b)	$\dfrac{bh^3}{36}$	$\dfrac{bh^2}{24}$
Rectangle (α, β, G, h, b)	$\dfrac{bh^3}{12}$	$\dfrac{bh^2}{6}$
Carré (α, β, G, b, b)	$\dfrac{b^4}{12}$	$\dfrac{b^3}{6}$

Tableau A (suite)

Section	Moment quadratique $I_{\alpha\beta}$	Module de flexion $\frac{I_{\alpha\beta}}{v}$
Rectangle creux (H, h, b, B, G, α, β)	$\frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H}$
Cercle (d, G, α, β)	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32}$
Couronne (D, d, G, α, β)	$\frac{\pi (D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 D}$
Ellipse (h, b, G, α, β)	$\frac{\pi bh^3}{64}$	$\frac{\pi bh^2}{32}$
Couronne elliptique (H, h, b, B, G, α, β)	$\frac{\pi (BH^3 - bh^3)}{64}$	$\frac{\pi (BH^3 - bh^3)}{32 H}$
Profilé en U (H, h, b, B, G, α, β)	$\frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H}$

Tableau A (suite)

Section	Moment quadratique $I_{\alpha\beta}$	Module de flexion $\frac{I_{\alpha\beta}}{v}$
Profilé en I	$\frac{BH^3 - 2bh^3}{12}$	$\frac{BH^3 - 2bh^3}{6H}$
Profilé en croix	$\frac{bH^3 + h^3(B - b)}{12}$	$\frac{bH^3 + h^3(B - b)}{6H}$
Section évidée	$\frac{b(H^3 - h^3)}{12}$	$\frac{b(H^3 - h^3)}{6H}$

5.2. Sections de forme complexe. — Le moment quadratique par rapport à un axe $\alpha\beta$ d'une section de surface S étant connu, le moment quadratique $I_{x'x}$ de cette même section par rapport à un axe $x'x$ parallèle à l'axe $\alpha\beta$ et à une distance d de ce dernier (fig. V-10) a pour valeur: $I_{x'x} = I_{\alpha\beta} + Sd^2$.

La section résistante d'une pièce de forme complexe est composée de plusieurs éléments. Le moment quadratique de la section s'obtient alors en faisant la somme des moments quadratiques de chacun de ces éléments, moments calculés par rapport à l'axe passant par le centre de gravité de la section totale, qui est l'axe neutre en flexion plane simple.

Si l'on connaît le moment quadratique de chaque élément qui compose la section, par rapport à l'axe qui passe par son propre centre de gravité, il est facile de calculer le moment quadratique de la section totale, par rapport à son axe neutre: on applique la formule précédente à chacun des éléments qui constituent la section pour calculer son moment quadratique par rapport à l'axe neutre de la section totale (fig. V-11). Puis on effectue la somme de ces moments quadratiques:

$$I_{x'x} = I_{\alpha_1\beta_1} + S_1d_1^2 + I_{\alpha_2\beta_2} + S_2d_2^2 + I_{\alpha_3\beta_3} + S_3d_3^2$$

Remarque 1: Éventuellement, *il faut retrancher* les moments des éléments qui ne comportent pas de matière, comme, par exemple, celui de la section intérieure d'un tube (voir *Couronne*, tableau A).

Fig. V-10

Fig. V-11

G : centre de gravité de la section totale

Remarque 2: Pour les profilés du commerce (I, H, U, L, T, ronds ou carrés pleins, tubes circulaires ou carrés) les catalogues des fabricants indiquent généralement pour chaque dimension: poids au mètre, moment quadratique et module de flexion.

6. EXEMPLES DE CALCUL

6.1. Charge concentrée. — La poutre, reposant sur deux appuis simples A et B, supporte une charge concentrée (fig. V-12). On pose: $AB = l$. La charge P s'exerce sur la poutre au point C situé à la distance a de l'appui A.

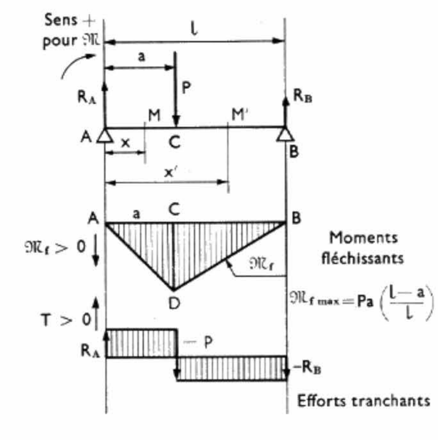


Fig. V-12 — Charge localisée
Diagrammes des moments fléchissants et des efforts tranchants

1° *Réactions des appuis.* — On isole la poutre AB, en remplaçant les appuis A et B par les réactions correspondantes R_A et R_B. Les conditions d'équilibre permettent d'écrire :

$$R_A = P \cdot \frac{(l - a)}{l}$$

$$R_B = P \cdot \frac{a}{l}$$

$$R_A + R_B = P$$

2° *Effort tranchant.* — Dans la section S_M située à gauche du point C : $T = R_A$; dans la section $S_{M'}$ située à droite de C : $T = R_A - P$. D'après les équations d'équilibre on a :

dans la section S_M : $\quad T = P \cdot \frac{(l - a)}{l}$

dans la section $S_{M'}$: $\quad T = -R_B = -P \cdot \frac{a}{l}$

Donc, l'effort tranchant est constant : il est égal à $P \cdot \frac{(l - a)}{l}$ dans les sections situées à gauche du point d'application de la charge et à $-P \cdot \frac{a}{l}$ dans les sections situées à droite.

3° *Moment fléchissant.* — Dans les sections S_M et $S_{M'}$, respectivement situées aux distances x et x' de A, $\mathcal{M}_f$ vaut, au point M : $\mathcal{M}_f = R_A \cdot x$, et au point M' : $\mathcal{M}_f = R_A \cdot x' - P(x' - a)$.

En remplaçant R_A par sa valeur donnée par les équations d'équilibre, on obtient au point M : $\mathcal{M}_f = P \cdot (l - a) \cdot \frac{x}{l}$ et au point M' : $\mathcal{M}_f = P \cdot a \cdot \frac{(l - x')}{l}$.

Pour les sections de gauche, le moment fléchissant augmente avec x : c'est-à-dire au fur et à mesure que la section S_M se déplace vers C ; c'est en ce point qu'il est maximal.

Pour les sections de droite, le moment fléchissant croît avec $l - x'$, donc quand x' décroît, c'est-à-dire si la section $S_{M'}$ se rapproche de C. En conclusion : le moment fléchissant $\mathcal{M}_f$ est maximal pour la section qui contient la force P, soit pour : $x = x' = a$, et $\mathcal{M}_{f\max} = P \cdot a \cdot \frac{(l - a)}{l}$.

On voit que $\mathcal{M}_f$ est une fonction linéaire de x ; sa variation le long de AB est représentée graphiquement par les deux droites AD et DB (V. fig. V-12). L'ordonnée de D représente la valeur maximale de $\mathcal{M}_f$.

Remarque :

a) Dans le cas d'une charge concentrée au milieu de la poutre, c'est-à-dire pour : $a = \frac{l}{2}$, on a : $\mathcal{M}_{f\max} = P \cdot \frac{l}{4}$.

b) Dans le cas où une poutre est soumise à un certain nombre de charges concentrées P_1, P_2, P_3 appliquées aux points C, D et E (fig. V-13), la méthode la plus simple

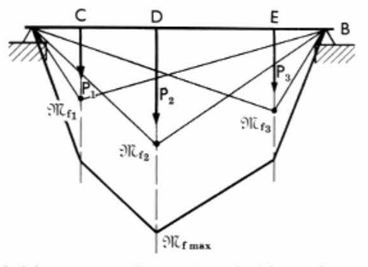


Fig. V-13

Moment fléchissant résultant avec charges simultanées en C, D, E

de calcul du moment fléchissant total consiste à déterminer le moment qui correspond à chaque charge supposée agir seule, puis, en chaque point de la poutre, à faire la somme des moments en ce point. On obtient ainsi le moment résultant $\mathcal{M}_f$. L'opération peut se faire graphiquement : il suffit de faire la somme des ordonnées des moments aux points C, D et E.

4° *Condition de sécurité.* — Les dimensions de la section sont déterminées par la condition de sécurité :

$$n_{\max} = \frac{\mathcal{M}_{f\max} \cdot v}{I_{\alpha\beta}} \leqslant R_{pt} \text{ (ou } R_{pc})$$

soit :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} \geqslant \frac{\mathcal{M}_{f\max}}{R_{pt} \text{ (ou } R_{pc})}$$

C'est donc le module de flexion $\frac{I_{\alpha\beta}}{v}$ qui conditionne le choix des dimensions et des formes de la section.

6.2. Charge uniformément répartie. — La poutre repose sur deux appuis A et B, elle est chargée uniformément sur toute sa longueur à raison de p décanewtons par millimètre (fig. V-14) et la charge totale est :

$$P = p \cdot l$$

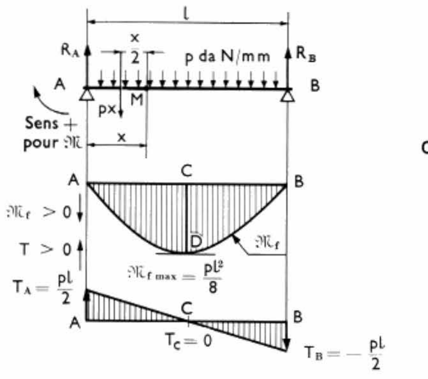


Fig. V-14

Charge uniformément répartie : diagramme des moments fléchissants et diagramme des efforts tranchants

1° *Réactions des appuis.* — Les conditions d'équilibre donnent immédiatement :

$$R_A = R_B = \frac{p \cdot l}{2}$$

2° *Efforts tranchants.* — On traite ce problème comme ci-dessus ; dans une section S_M, située à la distance x du point A : $T = p\left(\frac{l}{2} - x\right)$.

L'effort tranchant est donc représenté par une droite et a pour valeur en A : $T = \frac{pl}{2}$, en B : $T = -\frac{pl}{2}$, et en C, milieu de la poutre $\left(x = \frac{l}{2}\right)$: $T = 0$.

3° *Moment fléchissant.* — En M, le moment fléchissant est égal à la somme du moment de R_A et du moment de la charge px répartie sur la longueur x, soit :

$$\mathcal{M}_f = \frac{pl \cdot x}{2} - \frac{px \cdot x}{2}, \text{ ou : } \mathcal{M}_f = \frac{px(l - x)}{2}$$

$\mathcal{M}_f(x)$ est donc une fonction du 2ᵉ degré par rapport à x et sa variation de A à B est représentée par une parabole passant par A et B ; en effet :

$$\mathcal{M}_f(0) = \mathcal{M}_f(l) = 0$$

Le maximum de $\mathcal{M}_f(x)$ est obtenu pour la valeur de x qui annule sa dérivée, soit :

$$\frac{d}{dx}\mathcal{M}_f(x) = \frac{pl}{2} - px = 0$$

ou :

$$x = \frac{l}{2}$$

Le moment fléchissant est donc maximal en C au milieu de la poutre et vaut : $\mathcal{M}_{f\max} = \frac{pl^2}{8}$.

6.3. Cas de charge usuels. — Les valeurs maximales des efforts tranchants, des moments fléchissants et des flèches, dans les principaux cas de charge des poutres fléchies, sont données dans le tableau B.

Tableau B

CAS DE CHARGE USUELS DES POUTRES FLÉCHIES

Efforts tranchants, moments fléchissants et flèches : valeurs maximales

Conventions de signe : $T(x) > 0$ et $f(x) > 0$ vers le haut, $\mathfrak{M}_f(x) > 0$ vers le bas

Cas de charge	Effort tranchant	Moment fléchissant	Flèche
	2 appuis libres ; 1 charge concentrée si : $a < l/2 < b$		
	$x < a : T = \frac{Pb}{l}$ $x > a : T = -\frac{Pa}{l}$	$\mathfrak{M}_{fC} = \frac{Pab}{l}$	$f(x_1) = -\frac{Pa\sqrt{(l^2 - a^2)^3}}{9\sqrt{3}\, l E I}$ $a < x_1 = l - \sqrt{\frac{l^2 - a^2}{3}} < \frac{l}{2}$
	si : $a = l/2 = b$		
	$x < a : T = \frac{P}{2}$ $x > a : T = -\frac{P}{2}$	$\mathfrak{M}_{fC} = \frac{Pl}{4}$	$f_C = -\frac{Pl^3}{48\, EI}$
	2 appuis libres ; charge uniformément répartie		
	$T_A = -T_B = \frac{pl}{2}$ $T_C = 0$	$\mathfrak{M}_{fC} = \frac{pl^2}{8}$ $x_C = \frac{l}{2}$	$f_C = -\frac{5}{384}\frac{pl^4}{EI}$
	2 appuis libres ; 2 charges concentrées égales et symétriques		
	$x < a : T = P$ $a < x < l - a : T = 0$ $x > l - a : T = -P$	$\mathfrak{M}_{f\,max} = Pa$ $a < x < l - a$	$f(x_1) = -\frac{Pa}{24\, EI}(3l^2 - 4a^2)$ $x_1 = \frac{l}{2}$
	2 appuis encastrés ; 1 charge concentrée si : $a < l/2 < b$		
	$\begin{cases} x < a \\ T = \frac{Pb^2}{l^3}(l + 2a) \end{cases}$ $\begin{cases} x > a \\ T = -\frac{Pa^2}{l^3}(l + 2\,b) \end{cases}$	$\mathfrak{M}_{fA} = -\frac{P\,ab^2}{l^2}$ $\mathfrak{M}_{f\,max} = \mathfrak{M}_{fC} = \frac{2\,P\,a^2b^2}{l^3}$ $\mathfrak{M}_{fB} = -\frac{P\,a^2b}{l^2}$	$f(x_1) = -\frac{2\,P\,b^2a^3}{3\,EI\,(l + 2a)^2}$ $a < x_1 = l\frac{2a}{l + 2a} < \frac{l}{2}$
	si : $a = l/2 = b$		
	$x < \frac{l}{2} : T = \frac{P}{2}$ $x > \frac{l}{2} : T = -\frac{P}{2}$	$-\mathfrak{M}_{fA} = \mathfrak{M}_{fC}$ $= -\mathfrak{M}_{fB} = \frac{Pl}{8}$	$f_C = -\frac{Pl^3}{192\, EI}$

Tableau B (suite)

Cas de charge	Effort tranchant	Moment fléchissant	Flèche
	2 appuis encastrés ; charge uniformément répartie		
	$T_A = \frac{pl}{2}$ $T_C = 0$ $T_B = -\frac{pl}{2}$	$\mathfrak{M}_{f\,max} = \mathfrak{M}_{fA} = \mathfrak{M}_{fB} = -\frac{pl^2}{12}$ $\begin{cases} x_C = \frac{l}{2} \\ \mathfrak{M}_{fC} = \frac{pl^2}{24} \end{cases}$	$f_C = -\frac{pl^4}{384\,EI}$
	1 appui encastré ; 1 charge concentrée à l'extrémité libre		
	$0 < x < l$: $T = P$	$\mathfrak{M}_{fA} = -Pl$	$f_B = -\frac{Pl^3}{3\,EI}$
	1 appui encastré ; 1 charge uniformément répartie		
	$T_A = pl$ $T_B = 0$	$\mathfrak{M}_{fA} = -\frac{pl^2}{2}$	$f_B = -\frac{pl^4}{8\,EI}$
	1 appui encastré ; 1 appui libre ; 1 charge concentrée au milieu		
	$\begin{cases} x < \frac{l}{2} \\ T = \frac{11}{16} P \end{cases}$ $\begin{cases} x > \frac{l}{2} \\ T = -\frac{5}{16} P \end{cases}$	$\mathfrak{M}_{f\,max} = \mathfrak{M}_{fA} = -\frac{3}{16} Pl$ $\mathfrak{M}_{fC} = \frac{5}{32} Pl$	$f(x_1) = -0{,}00931 \frac{Pl^3}{EI}$ $x_1 = 0{,}553\,l$

Tableau B (suite)

Type de poutre	Effort tranchant	Moment fléchissant	Flèche
	1 appui encastré ; 1 appui libre ; charge uniformément répartie		
	$T_A = \frac{5}{8} pl$ $T_C = 0$ $T_B = -\frac{3}{8} pl$	$\mathcal{M}_{f\,max} = \mathcal{M}_{fA} = -\frac{pl^2}{8}$ $\mathcal{M}_{fC} = \frac{9}{128} pl^2$, $x_C = \frac{5}{8} l$ $\mathcal{M}_f(x_2) = 0$, $x_2 = \frac{l}{4}$	$f(x_1) = -0{,}0054 \frac{pl^4}{EI}$ $x_1 = 0{,}58\, l$

6.4. Applications numériques

Premier exemple. — Une poutre cylindrique AB (acier mi-dur) est encastrée en A dans un bâti (fig. V-15). Elle a une longueur de 1 m et supporte une charge de 400 daN à son extrémité libre.

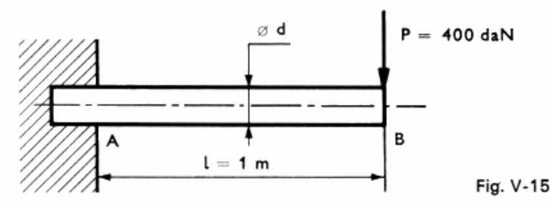


Fig. V-15

1° Quel doit être son diamètre, si l'acier utilisé a une contrainte admissible $R_p = 18$ daN/mm².

Le moment fléchissant maximal est en A et a pour valeur :

$$\mathcal{M}_{f\,max} = -P.l = -400 \times 1\,000 = -40.10^4 \text{ daN.mm}$$

La condition de sécurité, écrite sous la forme :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} \geqslant \frac{\mathcal{M}_{f\,max}}{R_p} = \frac{40.10^4}{18} = 2{,}22.10^4 \text{ mm}^3$$

détermine la valeur minimale de d. En effet (voir tableau A), le module de flexion d'une section circulaire pleine est :

$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \pi \frac{d^3}{32}$; et la condition de sécurité s'écrit donc :

$$d^3 \geqslant \frac{32.2{,}22.10^4}{3{,}14} = 226\,000 \text{ mm}^3, \text{ ou : } d \geqslant 60{,}9 \text{ mm.}$$

On adoptera : $d = 63$ mm (63 est une dimension normalisée : approvisionnement facile et économie).

2° Quel doit être le diamètre extérieur D d'un tube « Gaz », série forte d'épaisseur $e \approx \frac{D}{20}$, en acier doux ($R_p = 12$ daN/mm²) utilisé dans les mêmes conditions que ci-dessus ?

Le module de flexion d'un tel tube est (tableau A) :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \pi . \frac{(D^4 - d^4)}{32\,D} \approx \pi . D^3 \frac{1 - (0{,}9)^4}{32}$$

$$= 0{,}344 . \frac{\pi . D^3}{32}$$

La condition de sécurité donne :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = 0{,}344 . \frac{\pi . D^3}{32} \geqslant \frac{40.10^4}{12} = 3{,}33.10^4 \text{ mm}^3$$

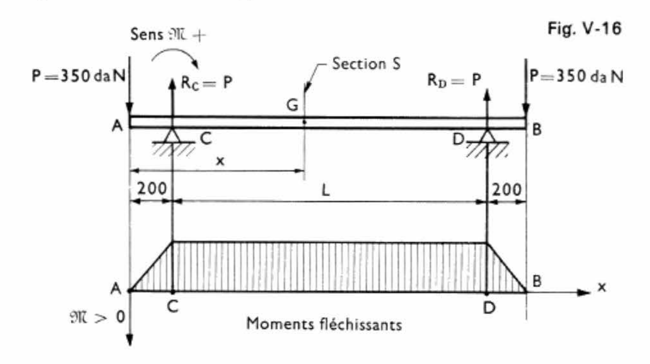
soit : $D^3 \geqslant \frac{32.3{,}33.10^4}{0{,}344.3{,}14} = 0{,}984.10^6$ mm³

ou : $D \geqslant 99{,}5$ mm

On adoptera un tube normalisé (dénommé « Gaz » 3″1/2) avec $D = 101{,}6$ mm et $e = 4{,}85$ mm dont le module de flexion est, tous calculs faits, 3,42.10⁴ mm³.

Deuxième exemple. — Un madrier en chêne (fig. V-16) a une section rectangulaire de largeur 100 mm et de hauteur 40 mm. Il est posé à plat sur les appuis C et D. Les charges concentrées P valent 350 daN et sont situées à 200 mm de part et d'autre des appuis.

Fig. V-16



1° Calculer la contrainte normale maximale en un point d'une section située entre C et D.

Les équations d'équilibre donnent immédiatement :

$$R_C = R_D = P = 350 \text{ daN}$$

Éléments de réduction en G, centre de gravité de la section S, des forces situées à gauche de cette section :

$$T = P - R_C = 0$$

$$\mathcal{M}_{f\,max} = -Px + P\,(x - 200)$$

$$\mathcal{M}_{f\,max} = -200\,P$$

$$= -200 \times 350 = -7.\ 10^4 \text{ daN. mm.}$$

Dans le cas particulier de cet exemple, $\mathcal{M}_{f\,max}$ ne dépend pas de l'abscisse x du centre de gravité de la section S : il est donc constant entre les appuis.

La contrainte normale maximale est :

$$n_{max} = \frac{\mathcal{M}_{f\,max} . v}{I_{\alpha\beta}}$$

Module de flexion de la poutre :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \frac{bh^2}{6} = \frac{100 \,.\, 40^2}{6} = 2{,}66 \,.\, 10^4 \text{ mm}^3$$

d'où : $$n_{\max} = \frac{7 \,.\, 10^4}{2{,}66 \,.\, 10^4} = 2{,}62 \text{ daN/mm}^2$$

Cette contrainte est *inadmissible :* $R_{pc} = 1{,}1$ daN/mm² pour le chêne.

2° Calculer la contrainte normale maximale dans le cas où le madrier est posé verticalement sur les appuis (largeur 40 mm et hauteur 100 mm).

On a alors :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \frac{40 \,.\, 100^2}{6} = 6{,}66 \,.\, 10^4 \text{ mm}^3$$

d'où : $$n_{\max} = \frac{7 \,.\, 10^4}{6{,}66 \,.\, 10^4} = 1{,}05 \text{ daN/mm}^2$$

Cette contrainte est *admissible.*

3° Calculer le diamètre d'une barre cylindrique en acier doux ($R_p = 12$ daN/mm²) travaillant dans les mêmes conditions que le madrier.

Condition de sécurité pour la barre :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \pi \,.\, \frac{d^3}{32} \approx 0{,}1 \,.\, d^3 \geqslant \frac{\mathcal{M}_{f\max}}{R_p}$$

d'où : $$0{,}1 \,.\, d^3 \geqslant \frac{7 \,.\, 10^4}{12} = 5{,}83 \,.\, 10^3 \text{ mm}^3$$

ou : $$d \geqslant 38{,}8 \text{ mm}$$

On adopte : $$d = 40 \text{ mm}$$

7. CHOIX DE LA SECTION

La condition de sécurité, appliquée à la section soumise au moment fléchissant maximal (V. § 3 et § 6.1,4°), détermine le module de flexion minimal de la section de la poutre :

$$\left[\frac{I_{\alpha\beta}}{v}\right]_{\min} = \frac{\mathcal{M}_{f\max}}{R_p}$$

Cette valeur se calcule avec R_{pt} ou R_{pc}, en prenant la plus faible des deux contraintes admissibles du matériau.

Ces calculs faits, la forme et les dimensions de la section restent indéterminées car il existe une infinité de sections possibles ayant toutes ce module de flexion.

Remarque : la condition de déformation (V. § 4.2), quand elle est plus sévère que la condition de sécurité, détermine la valeur $[I_{\alpha\beta}]_{\min}$ qui donne lieu à des considérations analogues.

7.1. Formes économiques courantes.

— On sélectionne d'abord une forme simple, donc économique à réaliser, telle que circulaire ou rectangulaire.

Il faut ensuite choisir les dimensions. Pour une section rectangulaire, par exemple, b et h satisfont à l'équation :

$$bh^2 = 6\left[\frac{I_{\alpha\beta}}{v}\right]_{\min}$$

Soit pour le madrier du deuxième exemple ci-dessus : $bh^2 = 400$ cm³. D'où : $S_1 = 80$ cm², $b_1 = 16$ cm, pour $h_1 = 5$ cm ; $S_2 = 55$ cm², $b_2 = h_2 = 7{,}37$ cm (carré) ; $S_3 = 40$ cm², $b_3 = 4$ cm, pour $h_3 = 10$ cm ; $S_4 = 25$ cm², $b_4 = 1{,}6$ cm, pour $h_4 = 16$ cm (fig. V-17). On constate, qu'à même $\frac{I_{\alpha\beta}}{v}$, c'est-à-dire à même $n_{\max}$ pour $\mathcal{M}_f$ donné, la surface de la section varie comme l'inverse de la hauteur, ce qui justifie le choix de sections simples de hauteur relative h/b importante ; d'où : économies de matière, de réalisation et de manutention (poids proportionnel à S).

Toutefois, le rapport h/b est limité par le risque d'apparition du phénomène de déversement de la poutre (V. fig. V-17) ; pratiquement : $h/b \leqslant 5$.

Les proportions des profilés du commerce (I, H et U) évitent ce défaut.

Fig. V-17 — Déversement d'une poutre de grande hauteur

7.2. Formes légères et rigides.

— Déjà dans le cas précédent, la flèche est réduite par le choix d'un rapport h/b important. En effet, les poutres de sections rectangulaires de même $\left[\frac{I_{\alpha\beta}}{v}\right]_{\min}$ ont un moment quadratique $I_{\alpha\beta} = v\left[\frac{I_{\alpha\beta}}{v}\right]_{\min}$ proportionnel à leur hauteur h, puisque $v = \frac{h}{2}$, et par conséquent une flèche inversement proportionnelle à h.

Pour des sections creuses, plus difficiles à réaliser, le gain sur la flèche et sur le poids est encore plus grand. Ainsi, dans le premier exemple ci-dessus, la barre de diamètre $d = 63$ mm peut être remplacée par un tube mince de diamètre extérieur $D = 180$ mm réalisé en tôle d'acier mi-dur d'épaisseur 0,9 mm : ce tube est 6 fois plus léger que la barre (4 kg au lieu de 24) et sa flèche est 3 fois plus faible (3 mm au lieu de 8,7).

Ces propriétés sont à la base des réalisations modernes : ouvrages d'art, carrosseries d'automobiles et structures d'avions.

7.3. Formes de grande rigidité.

— Dans de nombreux cas, machines-outils, par exemple, les déformations doivent rester extrêmement petites : c'est le calcul de $f_{\max}$ et de $[I_{\alpha\beta}]_{\min}$ qui oriente le choix des sections. Celles-ci sont en général creuses avec des parois épaisses et une grande hauteur pour obtenir le moment quadratique maximal.

8. POUTRES D'ÉGALE RÉSISTANCE

Les diagrammes de moments fléchissants du tableau B mettent en évidence leur variation le long des poutres et montrent que les différentes sections d'une poutre supportent des contraintes variant comme $\mathcal{M}_f$. Si l'on donne à chaque section des dimensions telles qu'elle travaille à la contrainte admissible du métal, on fera une économie de matière par rapport à la section uniforme calculée précédemment (V. § 3) en fonction de $\mathcal{M}_{f\max}$. Dans ce paragraphe, on considère la valeur absolue de $\mathcal{M}_f$.

Comment varie cette section pour une poutre AB (fig. V-18) encastrée en A, de section rectangulaire et chargée à son extrémité libre par une charge P ? On a vu que $\mathcal{M}_f$ est maximal en A : $\mathcal{M}_{f\max} = P \,.\, l$. Pour une section quelconque M, à une distance x de B :

$$\mathcal{M}_{fM} = P \,.\, x$$

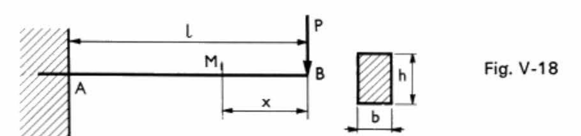


Fig. V-18

Pour que chaque section travaille à la contrainte R_p, il faut : $$\frac{\mathcal{M}_{fM} \,.\, v}{I_{\alpha\beta}} = R_p \quad \text{ou : } Px = \frac{R_p \,.\, I_{\alpha\beta}}{v}$$

La section de la poutre étant rectangulaire :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \frac{bh^2}{6}, \text{ d'où : } Px = \frac{R_p \,.\, bh^2}{6}$$

Deux cas peuvent se présenter :

1° *La hauteur h de la poutre est constante.* — D'après la relation précédente, la largeur b de chaque section est définie par :

$$b = \frac{6\,Px}{R_p \,.\, h^2}$$

b est donc une fonction linéaire de x et augmente avec la distance de la section au point B. À l'extrémité de la poutre : $x = 0$, et : $b = 0$.

À l'encastrement : $x = l$, et : $b = \dfrac{6\,Pl}{R_p h^2}$.

Les faces supérieures et inférieures de la poutre sont des triangles isocèles (fig. V-19) : il faut moitié moins de matière que pour une poutre à section constante.

2° *La largeur b de la poutre est constante.* — La hauteur h de chaque section est définie par : $h^2 = \dfrac{6\,Px}{R_p\,b}$;

h varie le long de AB suivant une parabole. Au point d'application de la charge : $x = 0$, et : $h = 0$; h est maximal pour $x = l$:

$$h_{\max} = \left(\frac{6\,Pl}{R_p \,.\, b}\right)^{1/2}$$

Les faces verticales de la poutre sont des surfaces paraboliques (fig. V-20). L'économie de matière est de 33 %.

Cependant les difficultés de fabrication et l'augmentation du prix de revient ne sont justifiées que par des considérations impératives de légèreté de la pièce ou de prix du matériau.

On remarque aussi que la section à l'extrémité de la poutre doit résister à l'effort tranchant dû à P ; on doit donc avoir : $\dfrac{P}{S_B} \leqslant R_{pg}$; avec : $S_B = bh_0$, et : R_{pg}, contrainte admissible au cisaillement ;

d'où :
$$h_0 = \frac{P}{b \,.\, R_{pg}}$$

Ce qui conduit, fréquemment, à adopter une forme dont le profil est un trapèze rectangle, circonscrit au profil parabolique initial (fig. V-21). Cette solution permet aussi une réalisation facile de la pièce.

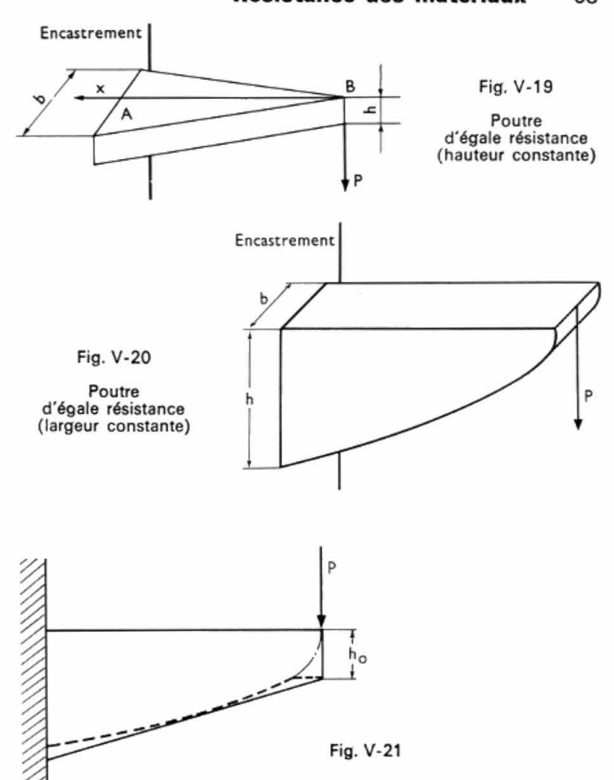


Fig. V-19
Poutre d'égale résistance (hauteur constante)

Fig. V-20
Poutre d'égale résistance (largeur constante)

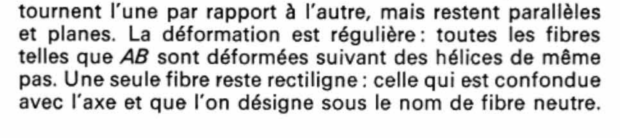


Fig. V-21

CHAPITRE VI

TORSION PLANE

1. GÉNÉRALITÉS

Dans l'étude précédente (flexion plane) le couple de torsion est nul en raison de la symétrie des forces par rapport au plan de symétrie de la poutre. Si ces forces ne sont pas symétriques, la section subit une rotation autour de l'axe longitudinal de la poutre, axe qui est perpendiculaire au plan de cette section : la sollicitation qui provoque cette rotation est appelée torsion.

1.1. Définition. — Un solide, qui présente un axe géométrique, est sollicité à la torsion seule, lorsqu'il est soumis aux actions de couples dont les plans sont perpendiculaires à son axe et dont les axes sont confondus avec son axe. Sur la figure VI-1 le couple de torsion est $F\,.\,d'$ et le couple de réaction de l'encastrement est $T\,.\,d$.

1.2. Hypothèse. — *La poutre est homogène et cylindrique.* Dans ces conditions, l'axe de la poutre reste rectiligne pendant la déformation et les sections droites tournent l'une par rapport à l'autre, mais restent parallèles et planes. La déformation est régulière : toutes les fibres telles que AB sont déformées suivant des hélices de même pas. Une seule fibre reste rectiligne : celle qui est confondue avec l'axe et que l'on désigne sous le nom de fibre neutre.

2. CONTRAINTES

2.1. Nature des contraintes. — On isole la partie droite cylindrique de la figure VI-1. L'élément cylindrique en équilibre est représenté figure VI-2. Pour maintenir l'équilibre, il faut appliquer sur chaque élément ΔS de la section S une force tangentielle telle que f. Les contraintes de torsion sont donc des contraintes tangentielles.

Soit $\mathcal{M}_t = F\,.\,d'$ le moment du couple qui sollicite la poutre à la torsion. À ce couple correspondent des couples élémentaires $2f'\rho$ de forces tangentielles, réparties uniformément le long de cercles de centre O', dans toute la

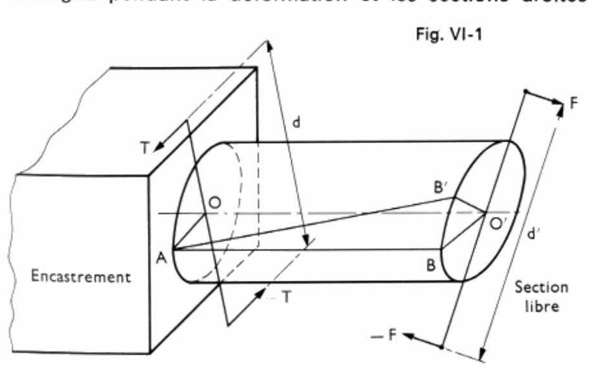


Fig. VI-1

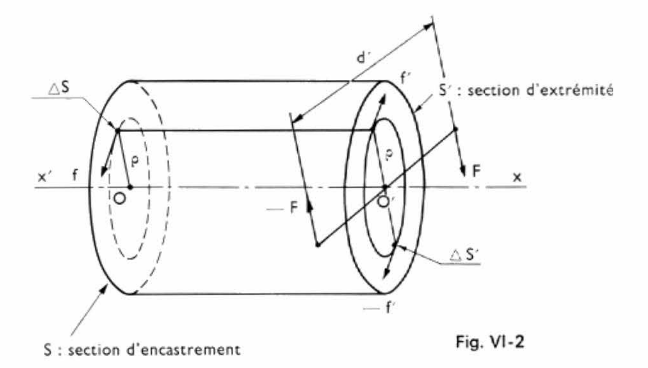


Fig. VI-2

section d'extrémité. Sur la figure VI-2 les forces f', sur des éléments de surface $\Delta S'$, sont représentées tangentes à la circonférence de rayon ρ. Par hypothèse : $\Sigma\, \rho . f' = \mathcal{M}_t$. Le tronçon étant en équilibre, le couple de réaction sur la section d'encastrement est égal en valeur absolue au couple de torsion, soit : $\mathcal{M}_t = \Sigma\, \rho . f' = \Sigma\, \rho . f$.

L'existence de forces tangentielles dans une section droite montre l'analogie entre les sollicitations de torsion et de cisaillement.

2.2. Déformation élastique. — On considère (fig. VI-3) deux sections droites très voisines S et S' situées à la distance Δx. Une portion de fibre telle que mn, située à la distance ρ de l'axe $x'x$, vient, après déformation élastique, en $m'n'$. Soit $\Delta\alpha$ l'angle dont la section S' a tourné par rapport à S. L'angle $\Delta\alpha$ intercepte sur la circonférence de rayon ρ un arc $n'n''$ dont la longueur est : $n'\, n'' = \rho . \Delta\alpha$ ($\Delta\alpha$ est exprimé en radians).

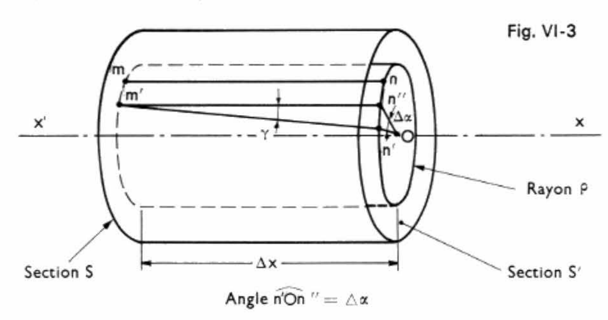


Fig. VI-3

Angle $\widehat{n'On''} = \Delta\alpha$

Comme la déformation élastique est très petite, la figure $m'n''n'$ peut être assimilée à un triangle rectangle. Par ailleurs, le glissement de la section S' par rapport à S peut être caractérisé par l'angle de déviation γ de la fibre $m'\, n'$.

La déviation a donc pour mesure :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{n'n''}{m'n''} = \frac{\rho . \Delta\alpha}{\Delta x}$$

Comme γ est très petit, on peut assimiler $\operatorname{tg} \gamma$ avec sa mesure exprimée en radians et par conséquent :

$$\gamma = \frac{\rho . \Delta\alpha}{\Delta x} \qquad (1)$$

2.3. Valeur de la contrainte. — Le glissement dû à la torsion est analogue à celui provoqué par le cisaillement et la contrainte tangentielle correspondante est donnée par l'expression : $t = G . \gamma$, formule déjà établie lors de l'étude du cisaillement.

Donc, d'après (1) : $t = \frac{G . \rho . \Delta\alpha}{\Delta x}$. Le rapport $\frac{\Delta\alpha}{\Delta x}$ représente l'angle de torsion rapporté à l'unité de longueur : il est appelé angle unitaire de torsion et il est désigné par θ. On a donc finalement : $t = G . \rho . \theta$; t étant exprimé en décanewtons par millimètre carré, G en décanewtons par millimètre carré, ρ en millimètres et θ en radians par millimètre.

3. ANGLE UNITAIRE DE TORSION

Sur la figure VI-2, la valeur de la force appliquée sur l'élément de surface ΔS est : $f = t . \Delta S$, où t est la contrainte tangentielle définie ci-dessus.

Il a été établi, au paragraphe 2, que : $\mathcal{M}_t = \Sigma\, \rho . f$ donc :

$$\mathcal{M}_t = \Sigma\, \rho . t . \Delta S \text{ ; ou : } \mathcal{M}_t = \Sigma \rho . G . \rho . \theta . \Delta S$$

soit : $\mathcal{M}_t = \Sigma\, \rho^2 . G . \theta . \Delta S$; que l'on peut écrire :

$\mathcal{M}_t = G . \theta . \Sigma\, \rho^2 \Delta S$; ($\Sigma\, \rho^2 \Delta S$ est le moment quadratique polaire de la section S par rapport à son centre O : on désigne cette expression par I_0).

La relation précédente s'écrit donc : $\mathcal{M}_t = G . \theta . I_0$, d'où l'expression de l'angle unitaire de torsion : $\theta = \frac{\mathcal{M}_t}{G I_0}$.

Et l'angle total de torsion de la pièce de longueur L est : $\alpha = \theta . L$.

Remarque : L'expression de la contrainte tangentielle définie précédemment : $t = G . \rho . \theta$, devient, en remplaçant θ par la valeur trouvée ci-dessus : $t = \frac{\rho . \mathcal{M}_t}{I_0}$.

4. CONDITION DE SÉCURITÉ

Si l'on désigne par v la distance des points de la section les plus éloignés de la fibre neutre, les points répondant à cette condition appartiennent à la surface de la poutre et la contrainte tangentielle correspondante aura la valeur maximale : $t_{max} = \frac{v . \mathcal{M}_t}{I_0}$, que l'on écrira : $t_{max} = \frac{\mathcal{M}_t}{\frac{I_0}{v}}$

L'expression $\frac{I_0}{v}$ est appelée module de torsion de la section.

Pour que la pièce résiste en toute sécurité à la torsion, il faut que la contrainte maximale soit inférieure à la contrainte admissible du métal au cisaillement : $t_{max} \leqslant R_{pg}$.

D'où la condition de sécurité à la torsion : $\mathcal{M}_t \leqslant \frac{R_{pg} . I_0}{v}$.

Remarque : Les formules de torsion établies ci-dessus sont applicables pour les poutres à section circulaire pleine ou creuse exclusivement. Dans les autres cas, la répartition des contraintes dans une section non circulaire n'est pas uniforme le long de cercles de centre O.

5. MOMENTS QUADRATIQUES POLAIRES

5.1. Section circulaire pleine. — Le moment quadratique polaire est : $I_0 = \frac{\pi d^4}{32} \approx 0{,}1 . d^4$. Le module de torsion, v étant égal à $\frac{d}{2}$, est : $\frac{I_0}{v} = \frac{\pi d^3}{16} \approx 0{,}2 . d^3$.

5.2. Section circulaire creuse. — Soit D le diamètre extérieur et d le diamètre intérieur. Le moment quadratique polaire est : $I_0 = \frac{\pi . (D^4 - d^4)}{32}$; et le module de torsion : $\frac{I_0}{v} = \frac{\pi . (D^4 - d^4)}{16\, D}$.

6. APPLICATION NUMÉRIQUE

Un arbre transmet une puissance de 20 000 W. Sa vitesse de rotation est : $n = 600$ tr/mn. La contrainte admissible au cisaillement de l'acier mi-dur utilisé est :

$$R_{pg} = 8 \text{ daN/mm}^2$$

Son module d'élasticité transversale est :

$$G = 8\,000 \text{ daN/mm}^2$$

Calculer le diamètre minimal de l'arbre qui transmet cette puissance en toute sécurité. On suppose que l'arbre ne subit pas de flexion appréciable et travaille seulement à la torsion plane.

Moment du couple de torsion : $\mathcal{M}_t = \frac{P}{\omega}$ (P en watts, ω en radians par seconde),

$$P = 2 . 10^4 \text{ W et : } \omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{600\, \pi}{30} = 20\, \pi \text{ rad/s}$$

$$\text{d'où : } \quad \mathcal{M}_t = \frac{2 . 10^4}{20\, \pi} = 320 \text{ N . m} = 32 \text{ daN . m}$$

$$\text{soit : } \quad \mathcal{M}_t = 32 . 10^3 \text{ daN . mm}$$

Condition de sécurité : $\frac{I_0}{v} \geqslant \frac{\mathcal{M}_t}{R_{pg}}$; ou : $0{,}2\, d^3 \geqslant \frac{32 . 10^3}{8}$;

soit : $d \geqslant 27{,}2$ mm. On adoptera : $d = 30$ mm.

Condition de déformation : Le diamètre d'un arbre de grande longueur, pour éviter une brusque détente en cas de variation brutale du couple, sera calculé pour que la déformation angulaire entre les sections extrêmes soit infé-

rieure à une valeur maximale ; sinon l'arbre se comporterait comme un ressort de torsion. On fixe donc une limite à la déformation de torsion, telle que l'angle de torsion unitaire θ reste inférieur à une valeur maximale, par exemple : 0,25 degré par mètre de longueur, valeur qui est couramment adoptée en pareil cas.

Les calculs doivent alors être conduits de la façon suivante :

1° Valeur maximale de θ en radians par millimètre :

$$\theta_{max} = \frac{0{,}25 \, . \, \pi}{180} \approx 4 \, . \, 10^{-3} \text{ rad/m} = 4 \, . \, 10^{-6} \text{ rad/mm}$$

2° La formule de déformation indiquée plus haut donne :

$$I_0 \geqslant \frac{\mathcal{M}_t}{G\theta}$$

ou :

$$\frac{\pi d^4}{32} \approx 0{,}1 \, d^4 \geqslant \frac{32 \, . \, 10^3}{8 \, . \, 10^3 \, . \, 4 \, . \, 10^{-6}}$$

soit : $d^4 \geqslant 10^7$

d'où : $d \geqslant 56{,}2$ mm

On adoptera : $d = 60$ mm

Conclusion. — Le calcul à la condition de déformation impose une valeur de diamètre nettement plus grande que le calcul à la condition de sécurité. C'est évidemment cette deuxième valeur du diamètre qu'il faudra adopter, surtout si l'arbre a une grande longueur.

Remarque : On notera encore ici l'intérêt, comme en flexion, des sections creuses qui ont, à même $\frac{I_0}{v}$, un I_0 plus grand pour une section plus faible, donc plus légère.

CHAPITRE VII

SOLLICITATIONS COMPOSÉES

1. GÉNÉRALITÉS

Les sollicitations simples, extension, compression, cisaillement, flexion plane simple et torsion plane, agissent isolément : les contraintes et les déformations qu'elles provoquent se calculent assez simplement.

Or, les organes de machines, les poutres, les charpentes métalliques subissent le plus souvent des sollicitations complexes et simultanées, dites sollicitations composées : flexion accompagnée d'extension ou de compression, flexion accompagnée de torsion, torsion accompagnée de compression ou d'extension. Le mode de calcul des contraintes et des déformations engendrées par ces sollicitations composées est l'objet de ce chapitre.

2. FLEXION ET EXTENSION OU COMPRESSION

Ce type de sollicitation, appelé aussi *flexion plane composée* (V. chap. 5, § 1.5), correspond à l'exemple suivant.

Une poutre, encastrée à une extrémité et libre à l'autre, est soumise à l'action d'une charge oblique *F* qui agit à son extrémité libre (fig. VII-1).

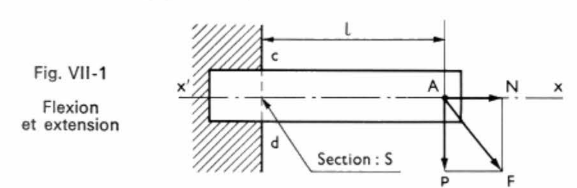
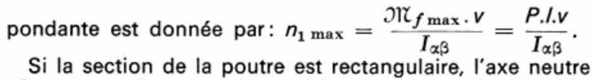


Fig. VII-1
Flexion et extension

Cette force admet deux composantes : *P* composante normale à l'axe $x'x$, *N* composante axiale dirigée suivant $x'x$.

2.1. *P* sollicite la poutre à la flexion. — Elle donne naissance, comme il a été vu dans l'étude de la flexion plane simple, à un moment fléchissant dont la valeur maximale, dans la section d'encastrement *S*, est $\mathcal{M}_{f\,max} = P.l.$ La contrainte normale maximale correspondante est donnée par :



$$n_{1\,max} = \frac{\mathcal{M}_{f\,max} \, . \, v}{I_{\alpha\beta}} = \frac{P.l.v}{I_{\alpha\beta}}.$$

Si la section de la poutre est rectangulaire, l'axe neutre $\alpha\beta$ passe par le centre de gravité de la section *G*, situé à la moitié de la hauteur.

Les contraintes maximales, de traction dans les fibres supérieures et de compression dans les fibres inférieures, sont égales et valent $n_{1\,max}$. La répartition des contraintes normales dues à la flexion est représentée par le diagramme de la figure VII-2.

2.2. *N* sollicite la poutre à l'extension. — Elle donne naissance à une contrainte uniforme d'extension dans la section, conformément au diagramme de la figure VII-3, dont la valeur est : $n_2 = \frac{N}{S}$.

2.3. Contraintes résultantes. — En appliquant le principe de la superposition des effets des forces, on obtient les contraintes résultantes qui sont indiquées sur la figure VII-4. Soit :

1° Pour les fibres supérieures, une contrainte d'extension : $n_{max} = n_{1\,max} + n_2$.

2° Pour les fibres inférieures, une contrainte résultante : $n'_{max} = n_{1\,max} - n_2$.

Cette dernière peut correspondre, soit à une extension, soit à une compression, suivant les valeurs absolues de n_2 et de $n_{1\,max}$.

Dans l'exemple choisi, $n_{1\,max}$ est plus grande en valeur absolue que n_2, par conséquent les fibres inférieures sont comprimées.

La répartition des contraintes dans la section est conforme au diagramme de la figure VII-4. Elle montre que l'axe neutre $\alpha'\beta'$ ne passe plus par le centre de gravité de la section, mais qu'il partage la hauteur du rectangle en deux segments qui sont entre eux dans le rapport algébrique :

$$\frac{G'D}{G'C} = - \frac{n_{1\,max} - n_2}{n_{1\,max} + n_2}$$

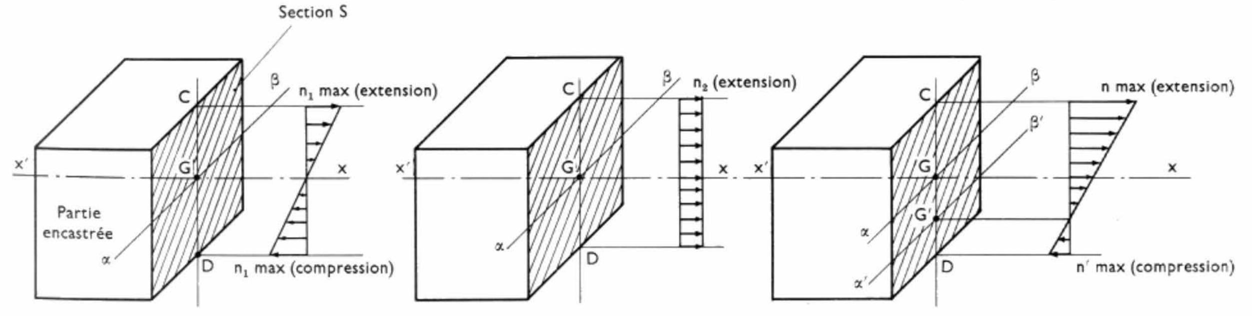


Fig. VII-2 — Contraintes dues à la flexion seule (action de P)

Fig. VII-3 — Contraintes dues à l'extension seule (action de N)

Fig. VII-4 — Contraintes résultantes (action de N et P)

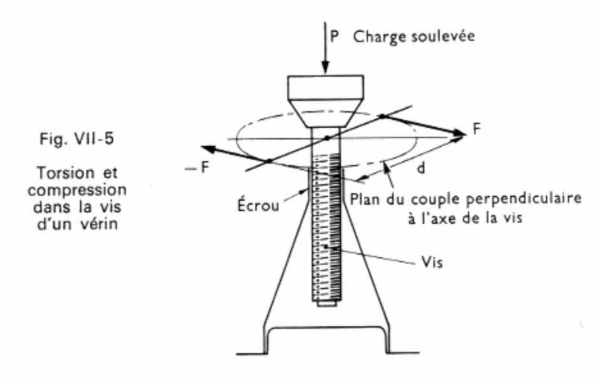


Fig. VII-5
Torsion et compression dans la vis d'un vérin

3. TORSION ET EXTENSION OU COMPRESSION

Un vérin à vis soulève une charge P (fig. VII-5). Le couple exercé pour la manœuvre est : $C_m = F.d$.

Le corps de la vis, soumis simultanément aux actions de la charge P et du couple C_m, est sollicité à la fois à la torsion et à la compression. La hauteur libre de la vis au-dessus de l'écrou est relativement faible par rapport à son diamètre : il n'y a donc pas risque de flambage.

3.1. Calcul de la vis. — Au centre de gravité d'une section de la vis, comprise entre le patin qui reçoit la charge P et l'écrou, la réduction des forces extérieures appliquées donne :

1° Un effort de compression P, qui crée une contrainte normale uniforme : $n = \dfrac{P}{S}$, avec S : section du noyau de la vis.

2° Un moment de torsion $\mathcal{M}_t$, égal au couple moteur, qui crée une contrainte tangentielle maximale pour les fibres les plus éloignées de l'axe, c'est-à-dire pour les fibres extérieures situées sur la circonférence qui correspond au noyau de la vis. D'où : $t = \dfrac{\mathcal{M}_t}{\dfrac{I_0}{v}}$;

avec : $\dfrac{I_0}{v} = 0{,}2\ d^3$

3.2. Condition de sécurité. — Pour cette double sollicitation, il faut : $(n^2 + 4\ t^2)^{1/2} \leqslant R_{pc}$, où : R_{pc} est la contrainte admissible à la compression du métal de la vis.

Remarque : Si l'effort normal est un effort d'extension, on prend R_{pt}, contrainte admissible à l'extension.

4. FLEXION ET TORSION

4.1. Exemple. — Une manivelle motrice subit un effort F exercé par une bielle en A (fig. VII-6). Dans la section droite xy du corps de manivelle, faite à la jonction avec le moyeu, on fait la réduction, au centre de gravité G de cette section, des forces extérieures appliquées. On trouve trois éléments de réduction :

1° Un effort tranchant dont l'intensité est égale à F.

2° Un moment fléchissant : $\mathcal{M}_f = F.l$; ce moment est maximal à la jonction avec le moyeu : pour cette section l a en effet sa valeur maximale.

3° Un moment de torsion : $\mathcal{M}_t = F.a$.

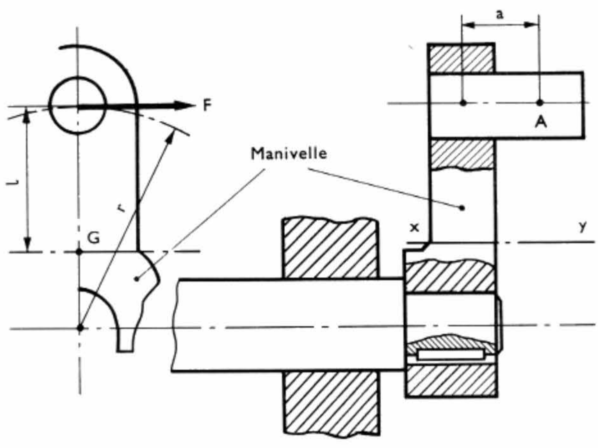


Fig. VII-6 — Flexion et torsion dans le corps d'une manivelle

4.2. Condition de sécurité. — La contrainte tangentielle, qui résulte de l'effort tranchant, est : $t = \dfrac{F}{S}$. Cette contrainte, généralement faible, est le plus souvent négligée. Le calcul de la section doit être fait en considérant uniquement un moment idéal de flexion, défini par la relation suivante :

$$\mathcal{M}_{fi} = \frac{1}{2}\,\mathcal{M}_f + \frac{1}{2}\,(\mathcal{M}_f^2 + \mathcal{M}_t^2)^{1/2}$$

$\mathcal{M}_{fi}$ est appelé moment idéal de flexion ; $\mathcal{M}_f$ et $\mathcal{M}_t$ sont respectivement le moment fléchissant et le moment de torsion définis plus haut.

Connaissant le moment de flexion idéal, il suffira de calculer la contrainte normale correspondante, donnée par la relation : $n_{\max} = \dfrac{\mathcal{M}_{fi} \cdot v}{I_{\alpha\beta}}$. Et la condition de sécurité de l'organe sera : $\mathcal{M}_{fi} \leqslant \dfrac{R_p \cdot I_{\alpha\beta}}{v}$.

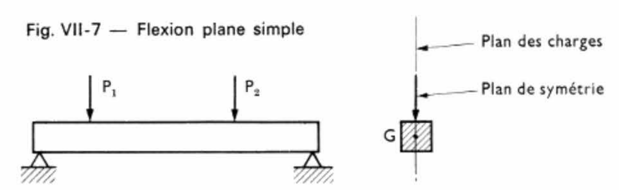
R_p étant la contrainte admissible du matériau à l'extension ou à la compression ; si la section est symétrique, on prendra la plus faible de ces valeurs pour assurer la sécurité.

Remarque : La formule du moment de flexion idéal se vérifie bien pour les matériaux fragiles, comme la fonte ou l'acier extra-dur. Pour les matériaux ductiles, comme l'acier doux ou mi-dur, la formule du moment de torsion idéal correspond mieux à l'expérience ; on prend : $\mathcal{M}_{ti} = (\mathcal{M}_f^2 + \mathcal{M}_t^2)^{1/2}$, et la condition de sécurité est : $\mathcal{M}_{ti} \leqslant \dfrac{R_{pg} \cdot I_0}{v}$, avec R_{pg} : contrainte admissible au cisaillement.

5. FLEXION DÉVIÉE SIMPLE

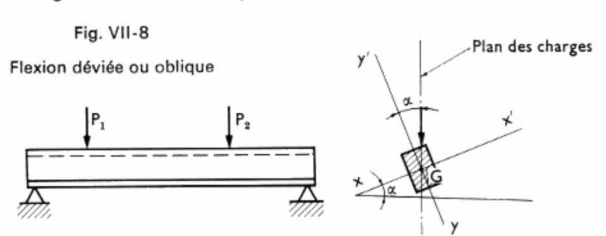
5.1. Définition. — Les hypothèses fondamentales (V. chap. 5, §1.2) relatives à la flexion plane simple, qui ont servi à établir les conditions de sécurité, impliquaient que la poutre devait avoir un plan de symétrie longitudinal et que les charges devaient être appliquées dans ce plan de symétrie (fig. VII-7).

Fig. VII-7 — Flexion plane simple



Si la poutre possède deux plans de symétrie longitudinaux perpendiculaires entre eux $x'x$ et $y'y$ (fig. VII-8), et que le plan dans lequel les charges sont situées est différent de ces plans de symétrie, on est en présence d'une *flexion déviée simple*, dite encore flexion oblique. Dans ce cas, l'expérience montre que tout se passe comme si la poutre subissait deux flexions planes simultanées agissant chacune dans l'un des plans de symétrie $x'x$ et $y'y$: les charges à considérer sont égales aux projections des charges réelles sur les plans de symétrie.

Fig. VII-8
Flexion déviée ou oblique



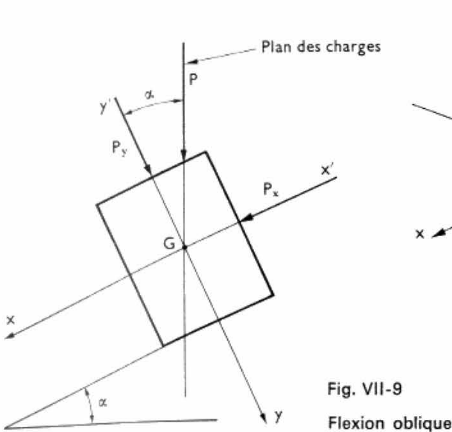


Fig. VII-9

Flexion oblique

Fig. VII-10 — Axe neutre de la section

Fig. VII-11

5.2. Détermination des contraintes. — Soit une poutre, sollicitée par une flexion oblique, de section rectangulaire (fig. VII-9). Cette section a pour axes de symétrie $x'x$ et $y'y$. L'axe $x'x$ forme un angle aigu α avec l'horizontale. Soit G le centre de gravité de la section et P la charge verticale appliquée à la poutre. Les projections de P sur les axes de symétrie de la poutre $x'x$ et $y'y$ sont respectivement :

$$P_x = P \sin \alpha, \text{ et} : P_y = P \cos \alpha$$

Si l'on désigne par $\mathcal{M}_f$ le moment fléchissant dans une section, dû à la charge P, le moment fléchissant dans la même section et dû à P_x sera égal à : $\mathcal{M}_{fx} = \mathcal{M}_f \sin \alpha$. Le moment fléchissant dû à la charge P_y sera, pour la même section : $\mathcal{M}_{fy} = \mathcal{M}_f \cos \alpha$.

Le moment fléchissant $\mathcal{M}_{fx}$ provoque une flexion, pour laquelle l'axe neutre de la section est $y'y$. De même, pour le moment fléchissant $\mathcal{M}_{fy}$ l'axe neutre est $x'x$. Soit un point M quelconque de coordonnées x et y et situé dans la section droite représentée par la figure VII-10. Les axes de coordonnées étant Gx et Gy, confondus avec les axes de symétrie, si $\mathcal{M}_f$ est le moment fléchissant réel dû à la charge P, n_x et n_y les contraintes normales provoquées par les moments fléchissants $\mathcal{M}_{fx}$ et $\mathcal{M}_{fy}$ au point M, la contrainte normale d'extension ou de compression au point M est égale à la somme algébrique des contraintes normales : $n = n_x + n_y$.

Ces contraintes n_x et n_y se calculent comme on l'a vu lors de l'étude de la flexion plane.

La formule de flexion : $n = \dfrac{\mathcal{M}_f . v}{I_{\alpha\beta}}$, appliquée ici, donne :

$$n_x = \frac{\mathcal{M}_{fx} . x}{I_{y'y}} = \frac{\mathcal{M}_f . x . \sin \alpha}{I_{y'y}}$$

$$\text{et} : \quad n_y = \frac{\mathcal{M}_{fy} . y}{I_{x'x}} = \frac{\mathcal{M}_f . y . \cos \alpha}{I_{x'x}}$$

$$\text{d'où} : \; n = n_x + n_y = \mathcal{M}_f \left[\frac{x . \sin \alpha}{I_{y'y}} + \frac{y . \cos \alpha}{I_{x'x}} \right]$$

5.3. Position de l'axe neutre. — Par définition, l'axe neutre est le lieu géométrique de tous les points de contrainte normale nulle et pour x et y, coordonnées d'un point quelconque de l'axe neutre $\alpha\beta$, la condition précédente s'écrit : $n = 0$, ou :

$$x . \sin \alpha . I_{x'x} + y . \cos \alpha . I_{y'y} = 0$$

On peut écrire cette formule en faisant apparaître le rapport $\dfrac{y}{x}$ qui n'est autre que le coefficient angulaire de l'axe neutre :

$$\frac{y}{x} = - \frac{\operatorname{tg} \alpha . I_{x'x}}{I_{y'y}}$$

Si l'on désigne par β l'angle formé par l'axe neutre avec l'axe $x'x$, on obtient : $\operatorname{tg} \beta = - \operatorname{tg} \alpha \dfrac{I_{x'x}}{I_{y'y}}$.

5.4. Condition de sécurité. — Le point de la section, qui subit la contrainte maximale, est l'un des deux points les plus éloignés de l'axe neutre. On calculera donc les coordonnées X et Y de ces points que l'on portera ensuite dans la relation :

$$n = \mathcal{M}_{f\max} \left[\frac{X . \sin \alpha}{I_{y'y}} + \frac{Y . \cos \alpha}{I_{x'x}} \right]$$

et il suffira de vérifier que la plus grande des deux valeurs obtenues est inférieure à la contrainte admissible, à l'extension ou à la compression, du matériau : $n_{\max} \leqslant R_p$.

5.5. Application. — Une poutre en bois repose sur deux appuis placés près des extrémités. Sa longueur est de 2 m. La section est rectangulaire (largeur : 8 cm ; hauteur : 12 cm). Elle supporte une charge uniformément répartie de 200 daN/m. Sachant qu'elle est placée de telle sorte que sa base forme un angle de 20° avec l'horizontale, déterminer la contrainte maximale de flexion (fig. VII-11).

— *Moment fléchissant maximal.* — On est dans le cas d'une charge uniformément répartie avec : $p = 2$ daN/cm, et : $l = 200$ cm, d'où :

$$\mathcal{M}_{f\max} = \frac{pl^2}{8} = 10^4 \text{ daN.cm}$$

— *Moments quadratiques*

$$I_{x'x} = \frac{bh^3}{12} = 1\,152 \text{ cm}^4$$

$$I_{y'y} = \frac{hb^3}{12} = 512 \text{ cm}^4$$

— *Contrainte maximale.* — Pour $\alpha = 20°$, on a : $\sin \alpha = 0{,}342$, et $\cos \alpha = 0{,}94$. La formule de contrainte ci-dessus donne pour le point A, le plus éloigné de l'axe neutre et de coordonnées : $X = 4$, et : $Y = 6$:

$$n_{\max} = 10^4 \left[\frac{4 . 0{,}342}{512} + \frac{6 . 0{,}94}{1\,152} \right] = 74 \text{ daN/cm}^2$$

— *Position de l'axe neutre.* — Pour $\alpha = 20°$, $\operatorname{tg} \alpha = 0{,}364$;

$$\text{d'où} : \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{1\,152 . 0{,}364}{512} = 0{,}82, \text{ et} : \beta \approx 39°$$

5.6. Charges dans des plans différents. — La poutre de la figure VII-12 supporte des charges P et Q

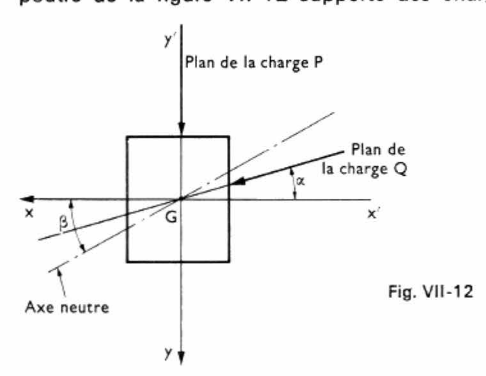


Fig. VII-12

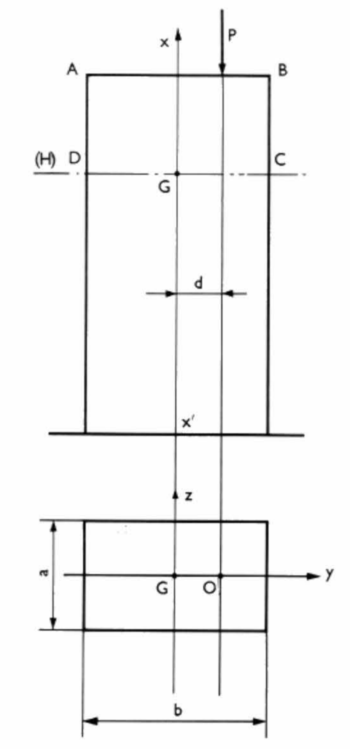


Fig. VII-13

Compression sous charge excentrée

situées dans deux plans différents. Cette étude peut se ramener au cas précédent en considérant les composantes des forces P et Q parallèles aux plans de symétrie $x'x$ et $y'y$. On obtient : des charges verticales P et $Q \cdot \sin \alpha$ donnant le moment fléchissant $\mathcal{M}_{fy}$, et une charge horizontale $Q \cdot \cos \alpha$ donnant le moment fléchissant $\mathcal{M}_{fx}$. Le calcul se poursuit comme dans l'application précédente.

6. COMPRESSION SOUS CHARGE EXCENTRÉE

6.1. Définition. — Soit une pièce courte dans les conditions définies lors de l'étude de la compression simple : il n'y a pas de risque de flambage. Cette pièce, de forme prismatique, représentée par la figure VII-13, repose par sa petite base sur un support fixe. Soit P la force verticale appliquée : elle est située dans le plan frontal de symétrie de la pièce (xGy). Son point d'application O se trouve à la distance d de l'axe longitudinal $x'x$. On a alors une compression excentrée, qui est un cas de *flexion plane composée.*

6.2. Détermination des contraintes. — Soit une section par un plan horizontal *(H)* : on isole la partie supérieure *ABCD* (fig. VII-14) de la pièce. Elle est soumise à la force extérieure P et aux actions de la partie inférieure (enlevée) dont la résultante est R.

1° La force P crée un moment fléchissant par rapport à l'axe Gz qui tend à faire fléchir la pièce et dont la valeur est : $\mathcal{M}_f = P \cdot d$. Ce moment est constant sur toute la hauteur de la pièce. Sous l'effet de $\mathcal{M}_f$ la section CD tend à tourner autour de l'axe Gz. Il apparaît des contraintes normales dues à cette flexion et dont les valeurs sont déterminées par

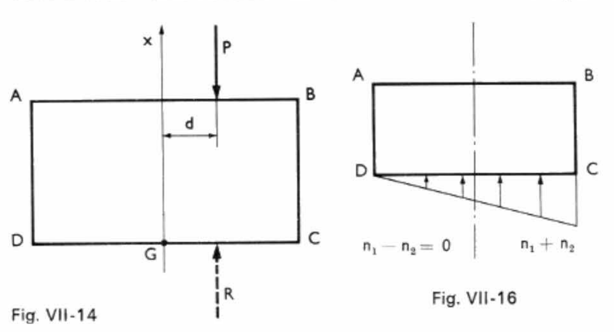


Fig. VII-14

Fig. VII-16

la formule de flexion simple : $n = \dfrac{\mathcal{M}_f \cdot v}{I_{Gz}}$. Dans le cas présent, on a : $v = \dfrac{b}{2}$ pour les fibres les plus éloignées de l'axe neutre, et qui correspondent aux points C et D. Par ailleurs : $I_{Gz} = \dfrac{ab^3}{12}$; ce qui donne :

$$n_1 = \frac{6\,Pd}{ab^2}$$

2° La charge P crée une compression de la pièce. Si P agissait seule, la contrainte uniforme sur la section définie par le plan (H) et due à cette compression, aurait pour valeur : $n_2 = \dfrac{P}{S} = \dfrac{P}{ab}$.

3° La répartition dans la section CD des contraintes normales n_1 dues à la flexion seule et n_2 dues à la compression seule est conforme à la figure VII-15. Sur cette figure,

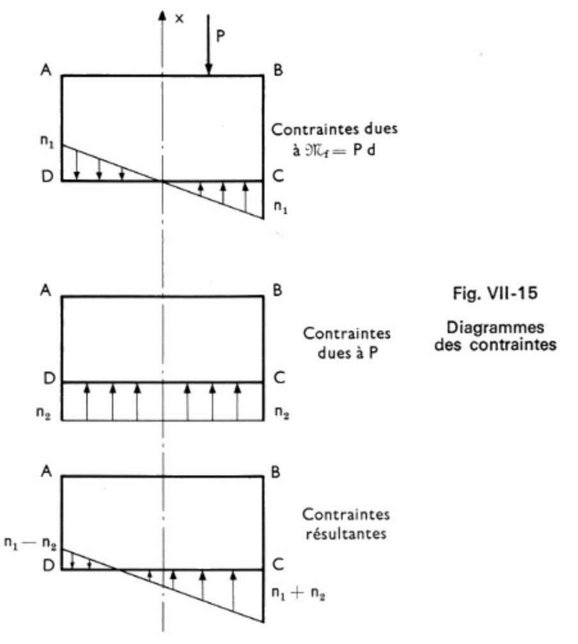


Fig. VII-15

Diagrammes des contraintes

le troisième diagramme représente la répartition des contraintes résultantes que l'on obtient en effectuant la somme algébrique des contraintes précédentes : $n = n_1 + n_2$.

Pour le point C la contrainte résultante correspond à une compression car les deux compressions n_1 et n_2 s'ajoutent :

$$n_C = \frac{6\,Pd}{ab^2} + \frac{P}{ab}$$

Pour le point D au contraire la contrainte normale d'extension n_1 est de signe contraire à celui de n_2 ; donc, pour ce point, les contraintes se retranchent :

$$n_D = \frac{6\,Pd}{ab^2} - \frac{P}{ab}$$

ce qui donne lieu à une résultante qui est : soit une compression, soit une extension, suivant les valeurs absolues de n_1 et de n_2.

6.3. Conditions de sécurité. — Pour que la pièce résiste en toute sécurité, il faut que la contrainte résultante maximale soit au plus égale à la contrainte admissible à la compression pour les fibres situées en C, et à l'extension pour les fibres situées en D. On aura donc :

$$n \text{ résultante} \leqslant R_{pc} \text{ ou } R_{pt}$$

Remarque : Pour les fibres situées en D, la contrainte résultante $(n_1 - n_2)$ peut être nulle si : $n_1 = n_2$, et, dans ce cas, le diagramme est conforme à la figure VII-16.

6.4. Noyau central

1° *Définition.* — Dans le cas où $n_1 - n_2 = 0$, (cas considéré dans la remarque précédente) la formule donnant la contrainte résultante s'écrit : $n_D = 0$, ce qui

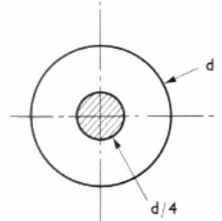
Fig. VII-17
Noyau central d'un rectangle

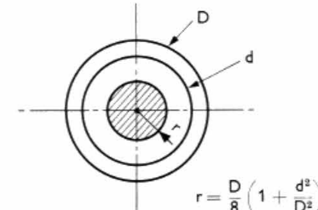
implique : $d = \frac{b}{6}$. Si la projection de la charge P est située, en vue de dessus, au point S (fig. VII-17) tel que : $GS = \frac{b}{6}$, la contrainte résultante au point D sera nulle. Si la charge P se projette entre les points S et G : il y aura compression dans toute la section de la pièce. Si la charge se projette à droite du point S, la contrainte résultante sera d'extension au point D (cas de la fig. VII-15). Pour des raisons de symétrie, si la charge se projette à gauche de l'axe de symétrie Gz, le point limite de sa projection se trouvera placé en U symétriquement à S, à la distance $\frac{b}{6}$ de G.

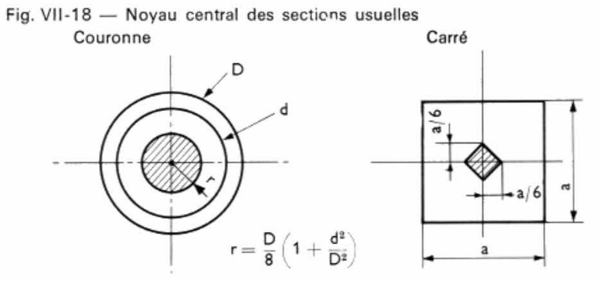
Si la charge ne se trouve plus dans le plan (xGy) mais dans le plan (xGz), la limite de sa projection devra se trouver soit au point R, soit au point T, situés à la distance $\frac{a}{6}$ de G, pour que la section soit tout entière comprimée et ne subisse aucune contrainte d'extension.

La ligne $RSTU$ définit le noyau *central* de la section considérée : si une force parallèle à l'axe se projette à l'intérieur ou sur le pourtour du noyau central, toute la section de la pièce sera comprimée.

Fig. VII-18 — Noyau central des sections usuelles







2° *Cas des sections usuelles.* — Les figures VII-17 et VII-18 définissent la forme de quelques noyaux centraux pour les sections les plus courantes.

6.5. Application numérique. — Un pilier creux en maconnerie, de forme tronconique (fig. VII-19), repose par sa base sur une dalle de béton. Il supporte une charge excentrée dont la ligne d'action est située à 0,50 m de son axe vertical. Les diamètres de sa base sont respectivement 2,58 m et 2,21 m. La contrainte admissible à l'extension de la maçonnerie étant nulle, vérifier qu'il ne subit en aucun point une contrainte d'extension.

Ici, le noyau central est circulaire et défini par la figure VII-18 ; son rayon a pour valeur : $r = \frac{D}{8}\left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right)$.

Le calcul donne : $r = 0{,}56$ m. En conclusion, la charge agissant à une distance inférieure à celle du rayon du noyau central, cette construction ne subit pas de contrainte d'extension.

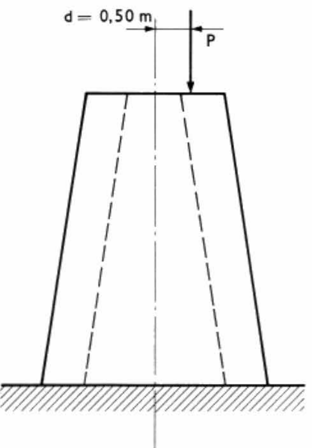


Fig. VII-19

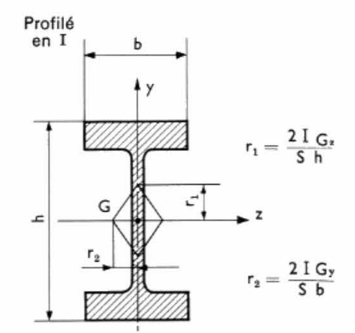
7. FLEXION DÉVIÉE COMPOSÉE

7.1. Poutres droites. — C'est le cas le plus général, il se traite comme suit.

La réduction des forces de gauche au centre de gravité d'une section (V. chap. 1 § 3 et chap. 5 § 2.1) permet de déterminer les sollicitations qu'elle subit, soit : un effort tranchant T projection sur son plan de la résultante R des forces de gauche, un effort normal N projection de R sur l'axe de la poutre, un moment fléchissant $\mathcal{M}_f$ et un moment de torsion $\mathcal{M}_t$.

À chacune de ces sollicitations simples, correspond une contrainte normale ou tangentielle que l'on sait calculer : la superposition des contraintes normales et la combinaison des contraintes tangentielles, suivant les règles exposées ci-dessus, permettent ensuite de calculer pour chaque section la valeur et la nature de la contrainte maximale.

En étudiant la variation de ces contraintes maximales le long de la poutre, on détermine le maximum, dont la comparaison avec la contrainte admissible du matériau à la sollicitation de même nature donne la condition de sécurité pour la poutre.



7.2. Poutres courbes. — La méthode précédente est applicable aux poutres courbes : la projection de la résultante R des forces de gauche se fait sur le plan d'une section normale à la fibre moyenne et sur la tangente à la ligne moyenne au point M considéré (fig. VII-20).

Remarque importante : Les valeurs ainsi calculées sont, au plus, inférieures de 5 % aux contraintes réelles tant que le rayon de courbure r de la ligne moyenne est partout supérieur à cinq fois la plus grande dimension transversale de la poutre courbe étudiée. Pour des rayons de courbure plus petits, les contraintes réelles augmentent rapidement du côté du centre de courbure.

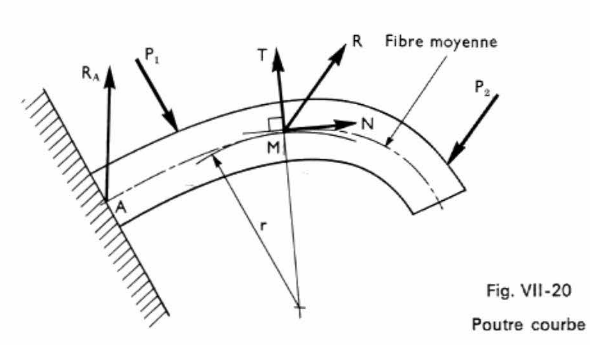


Fig. VII-20
Poutre courbe

CHAPITRE VIII

FLAMBAGE DES PIÈCES LONGUES

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Exemple et définition. — Une pièce, cylindrique ou prismatique, soumise à une charge N parallèle à son axe, peut travailler de deux façons. Si la pièce est courte, comparée à sa plus petite dimension transversale, elle travaille en compression simple (V. chap. 3) ; si la pièce est longue, elle travaille au flambage, sollicitation spéciale de flexion latérale accompagnant la compression (fig. VIII-1). Le flambage intervient dans de nombreux cas : poteaux, colonnes, barres comprimées de poutres en treillis, tiges de pistons de moteurs, bielles.

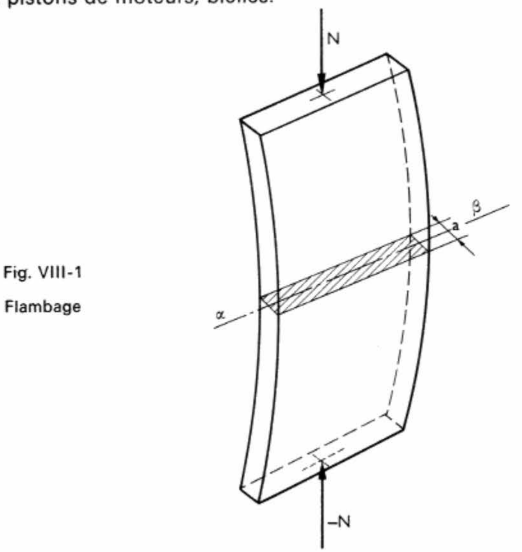


Fig. VIII-1
Flambage

1.2. Définition de l'élancement. — Pour déterminer dans quel cas une pièce doit être calculée au flambage, plutôt qu'à la compression simple, on utilise la notion d'*élancement*, définie par le rapport $\lambda = \frac{l}{\rho}$, dans lequel : ρ est le rayon de giration minimal de la section et l la longueur libre au flambage, différente de la longueur réelle L de la pièce.

1° *Rayon de giration :* on désigne par cette expression, la valeur : $\rho = \left(\frac{I_{\alpha\beta}}{S}\right)^{1/2}$, caractéristique d'une pièce de section droite S dont le moment quadratique minimal est égal à $I_{\alpha\beta}$.

2° *Longueur libre au flambage : l,* longueur libre fictive de la pièce soumise au flambage, dépend des liaisons de ses extrémités, qui peuvent être de différentes natures : appui libre, guidé, articulé ou encastré (fig. VIII-2).

Les valeurs suivantes sont adoptées pour l, en fonction de la longueur réelle L :

$l = 2\,L$, pour un encastrement et une extrémité libre ;
$l = L$, pour deux articulations guidées transversalement ;
$l = L$, pour deux encastrements libres transversalement ;
$l = 0{,}7\,L$, pour un encastrement et une articulation guidée transversalement ;
$l = 0{,}5\,L$, pour deux encastrements fixés transversalement ;
$l = 0{,}63\,L$, pour deux semi-encastrements fixés transversalement (poutres portant des planchers, colonnes à bases planes).

2. CONDITION DE SÉCURITÉ

La charge admissible au flambage est inférieure à la charge admissible à la compression simple. L'expérience a permis d'établir des formules semi-empiriques, plus ou moins complexes, corroborées par des calculs ultérieurs. On démontre que si $\lambda \leqslant 8$, on peut employer la formule de compression simple. Pour des valeurs supérieures, on fera appel aux formules suivantes :

2.1. Formule d'Euler. — Pour un élancement important :

$$\lambda \geqslant \lambda_e = \pi \sqrt{\frac{E}{R_{ec}}}$$

supérieur à la limite λ_e qui dépend du matériau utilisé (avec : E, module d'élasticité longitudinal et R_{ec}, limite d'élasticité à la compression, soit, fonte : $\lambda \geqslant 80$; bois : $\lambda \geqslant 95$; acier doux : $\lambda \geqslant 110$), on utilise la formule théorique d'Euler : elle donne la charge maximale applicable dans la limite des déformations élastiques et au-delà de laquelle la flexion latérale devient instable et augmente spontanément jusqu'à la rupture. On appelle cette charge P_c : la *charge critique de flambage.*

La formule, établie par Euler dès 1744, est la suivante :

$$P_c = \frac{\pi^2 . E . I_{\alpha\beta}}{l^2}$$

dans laquelle : E est le module d'élasticité longitudinal du matériau ; $I_{\alpha\beta}$, le moment quadratique minimal de la section et l, la longueur fictive libre au flambage.

D'où, la contrainte critique de flambage :

$$n_{cE} = \frac{P_c}{S} = \frac{\pi^2 E I_{\alpha\beta}}{l^2 S}$$

ou :

$$n_{cE} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leqslant R_{ec}$$

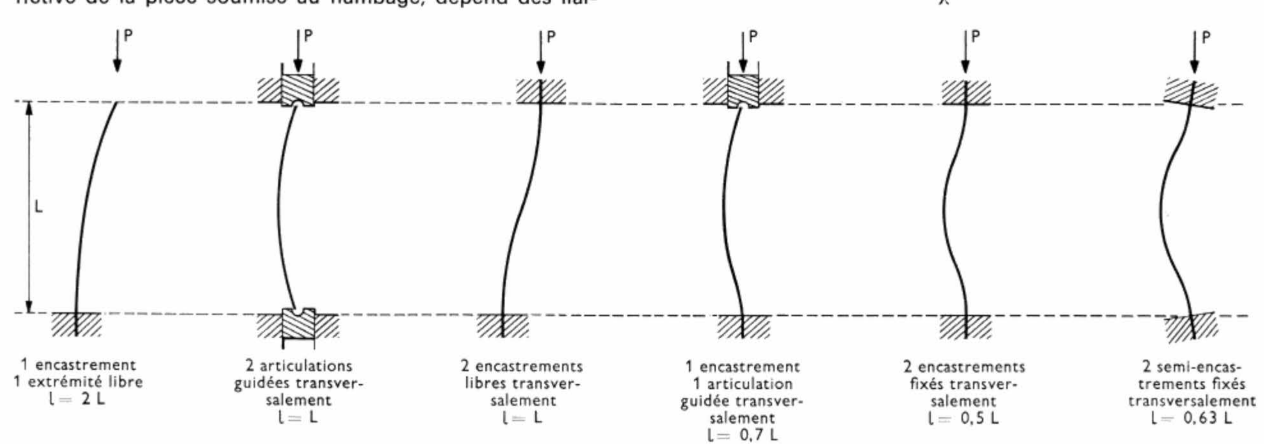


Fig. VIII-2 — Longueurs libres de flambage suivant la nature des liaisons des extrémités de la pièce

Pour obtenir la contrainte admissible en toute sécurité, on utilise un coefficient de sécurité s_1, qui varie suivant le matériau et les conditions de travail de la pièce ; on prend en général : 3 pour l'acier, 8 pour le bois et 10 pour la fonte.

D'où :

$$n_{aE} = \frac{n_{cE}}{s_1}$$

La *condition de sécurité* est donc :

$$n = \frac{N}{S} \leqslant n_{aE}$$

2.2. Formule de Rankine. — Pour un élancement λ inférieur à la valeur λ_e ci-dessus, limite d'application de la formule d'Euler, on utilise la formule semi-empirique de Rankine, qui donne comme contrainte critique :

$$n_{cR} = \frac{R_{ec}}{1 + \dfrac{R_{ec}}{\pi^2 E}\lambda^2}$$

ou :

$$n_{cR} = \frac{R_{ec}}{1 + \dfrac{R_{ec}}{n_{cE}}}$$

La formule de Rankine, établie à partir de l'étude de systèmes réels, nécessite un coefficient de sécurité s_2 plus faible que la formule d'Euler : on prend en général 1,66 pour l'acier, 4 pour le bois et 5 pour la fonte. D'où :

$$n_{aR} = \frac{n_{cR}}{s_2}$$

La *condition de sécurité* est donc :

$$n = \frac{N}{S} \leqslant n_{aR}$$

2.3. Remarques

1° La formule de Rankine est utilisable pour $\lambda > \lambda_e$ mais il faudrait alors augmenter le coefficient de sécurité s_2 avec la flexibilité des pièces, donc avec λ, pour retrouver la sécurité donnée dans ce domaine par la formule d'Euler à coefficient de sécurité s_1 constant.

2° Le calcul montre que le moment quadratique d'une pièce creuse est plus grand que celui de la pièce pleine qui a même surface de section. Pour cette raison, on choisit souvent les pièces creuses qui, à égalité de sections, résistent mieux au flambage.

CHAPITRE IX
RESSORTS

1. GÉNÉRALITÉS

Les ressorts ont tous la particularité de subir des déformations élastiques importantes, en absorbant une certaine énergie. Cependant, ils ne jouent pas tous le même rôle dans le fonctionnement des machines et leur mode de travail diffère : ils peuvent subir des sollicitations composées et l'énergie qu'ils absorbent peut être utilisée par récupération (ressorts de rappel, par exemple). Les théories et les calculs, qui concernent la résistance des matériaux, s'appliquent aux ressorts.

1.1. Matériaux. — Les matériaux utilisés pour l'exécution des ressorts sont le plus souvent :

1° L'acier mangano-siliceux, en barre laminée de diamètre 8 à 65 mm, dont les caractéristiques, après traitement thermique, sont les suivantes : charge de rupture R = 130 à 150 daN/mm² et limite d'élasticité R_e = 110 à 130 daN/mm² ; ce traitement thermique s'effectue après la mise en forme par « enroulement à chaud ».

2° Les aciers durs en fil étiré à froid de diamètre 0,1 à 12,5 mm (cordes à piano), qui sont très souvent des aciers spéciaux au nickel, et qui sont mis en forme par « enroulement à froid », par conséquent sans traitement thermique. Pour permettre cet enroulement, il faut respecter un rapport maximal entre le diamètre d du fil et le diamètre d'enroulement, en général : $d \leqslant 0{,}25\, D_m$, avec D_m, diamètre moyen d'enroulement ; le diamètre du fil ne dépasse jamais 13 mm. Ces aciers ont les caractéristiques suivantes : charge de rupture R = 150 à 170 daN/mm² et limite d'élasticité R_e = 125 à 150 daN/mm².

3° Pour des applications particulières, on utilise aussi : le laiton écroui, les bronzes phosphoreux, le bronze au béryllium, le métal Monel et l'acier inoxydable écroui.

1.2. Catégories. — Quelles que soient leurs formes et leurs applications, les différents types de ressorts se classent en deux catégories de base, qui correspondent aux deux sollicitations simples possibles du métal : la torsion et la flexion.

Les ressorts dont le métal travaille à la torsion comprennent les barres de torsion et les ressorts hélicoïdaux de compression et de traction, appelés très souvent ressorts à boudin et pour lesquels l'effort est toujours dirigé suivant l'axe d'enroulement.

Les ressorts dont le métal travaille à la flexion comprennent : les ressorts à lames, les ressorts spiraux et les ressorts hélicoïdaux pour lesquels la sollicitation est un couple de même axe que l'enroulement.

2. CAS DU MÉTAL SOLLICITÉ À LA TORSION

2.1. Choix du diamètre du fil. — Un ressort de compression est soumis à un effort P dirigé suivant l'axe d'enroulement (fig. IX-1) : on considère ce ressort comme une barre de torsion, de diamètre d et de longueur égale à la longueur développée du fil qui constitue le ressort, travaillant à la torsion sous l'action d'un couple $P.r$. La contrainte est :

$$t = \frac{16\,P.r}{\pi.d^3}$$

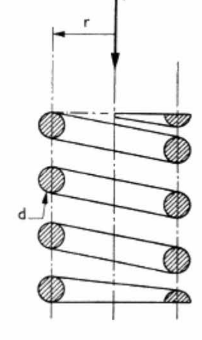


Fig. IX-1

P : charge appliquée
r : rayon moyen d'enroulement
d : diamètre du fil

La condition de sécurité à la torsion : $t \leqslant R_{pg}$ donne la relation qui permet de calculer le diamètre du fil :

$$\frac{16\,P.r}{\pi.d^3} \leqslant R_{pg}$$

ou :

$$d^3 \geqslant \frac{16\,P.r}{\pi.R_{pg}} \approx \frac{5\,P.r}{R_{pg}}.$$

Réciproquement, pour un ressort de rayon d'enroulement moyen r, en fil de diamètre d, la charge maximale admissible est :

$$P_{max} \leqslant \frac{\pi\,d^3}{16\,r} R_{pg} \approx 0{,}2\,\frac{d^3}{r} R_{pg}.$$

Remarque : Les ressorts, qui sont des organes de machines destinés à subir des déformations importantes, subissent des contraintes tangentielles élevées qui, bien entendu, doivent rester inférieures à la limite élastique au glissement R_{eg} du matériau.

Cette condition nécessite l'emploi d'aciers à limite élastique élevée et le choix d'une contrainte admissible au glissement R_{pg} voisine de cette limite élastique. Comme par ailleurs, pour les fils d'acier dur fortement

écroui par l'étirage, $R_{eg} \geqslant 0{,}6\ R_e$, on admet très souvent :

$$R_{pg} = 0{,}8\ R_{eg} \approx 0{,}5\ R_e \quad \text{(V. § 2.3 ci-dessous).}$$

2.2. Détermination de la flèche. — On détermine la déformation, ou flèche totale du ressort, en considérant le quart de spire représenté par la figure IX-2. Sous l'action du moment de torsion $\mathcal{M}_t = P \,.\, r$, la droite GAO vient en $G'A'O'$. Si l'on désigne par φ l'angle de déformation, on voit que, f_s étant la flèche par spire : $\frac{f_s}{4} = OO' = r \,.\, \text{tg}\ \varphi$.

Comme l'angle φ est faible, cette relation peut s'écrire : $f_s = 4\ r \,.\, \varphi$, avec φ exprimé en radians.

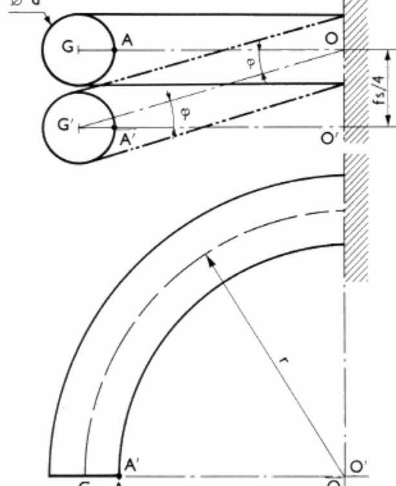


Fig. IX-2

Détermination de la flèche f

L'angle de torsion unitaire θ, entre deux sections distantes de l'unité de longueur, est donné par la relation indiquée précédemment : $\theta = \frac{\mathcal{M}_t}{G \,.\, I_0}$;

or :

$$\varphi = \frac{2\ \pi r}{4} \,.\, \theta$$

soit :

$$4\ \varphi = \frac{2\ \pi\ r \,.\, \mathcal{M}_t}{G\ I_0}$$

d'où :

$$f_s = \frac{2\ \pi\ r^2\ \mathcal{M}_t}{G\ I_0}$$

Comme $I_0 = \frac{\pi\ d^4}{32}$, pour un fil de diamètre d, et : $\mathcal{M}_t = P \,.\, r$, on a, pour une spire :

$$f_s = \frac{64\ P \,.\, r^3}{G \,.\, d^4}$$

et, pour un ressort de q spires utiles (exclus les 3/4 de spire rapprochée et meulée de chaque extrémité, V. fig. IX-1), on a une flèche totale :

$$f = \frac{64\ P \,.\, r^3 \,.\, q}{G \,.\, d^4}$$

2.3. Remarque importante. — La condition de sécurité à la torsion suppose que la contrainte tangentielle t est uniformément répartie sur toute la périphérie de la section du fil, puisqu'on a comparé le ressort à une barre qui travaille à la torsion. Cette hypothèse simplificatrice est inexacte pour les ressorts hélicoïdaux : en réalité, t croît vers l'intérieur du ressort du fait de la différence de longueur des fibres intérieures et extérieures, et cela d'autant plus que le rapport $\frac{d}{D_m}$ est plus près de la limite de 0,25. Comme, en pratique, ce rapport augmente avec d, on est conduit à limiter la contrainte admissible R_{pg} quand on emploie de grandes valeurs de d : l'abattement varie progressivement de 0 à 25 % du plus petit au plus gros diamètre de fil définis au paragraphe 1.1.

2.4. Fils de section non circulaire. — On vient de voir la méthode de calcul d'un ressort hélicoïdal dont la section du fil est circulaire. Il est parfois nécessaire d'exécuter ces ressorts avec du fil de section carrée ou rectangulaire et les formules précédentes sont alors modifiées. La théorie générale de l'élasticité conduit aux résultats ci-après.

1° *Section carrée* (fig. IX-3). — Si le côté du carré est égal à a, la charge maximale admissible est la suivante :

$$P_{\max} \leqslant \frac{a^3}{3\ r} \,.\, R_{pg}$$

et la flèche totale correspondante :

$$f = \frac{6\ \pi \,.\, P \,.\, r^3 \,.\, q}{G \,.\, a^4}$$

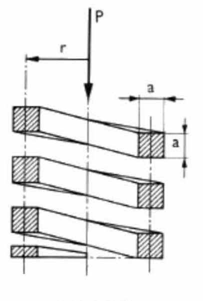


Fig. IX-3

Fig. IX-4

2° *Section rectangulaire* (fig. IX-4). — Les formules simplifiées ci-dessous donnent la valeur de f par excès et celle de $P_{\max}$ par défaut, avec un écart inférieur à 9 % si $b \geqslant 3\ e$; l'orientation du rectangle (b ou e parallèle à l'axe d'enroulement) n'intervient pas.

Charge maximale admissible :

$$P_{\max} \leqslant \frac{b \,.\, e^2}{3\ r} \,.\, R_{pg}$$

Flèche totale correspondante :

$$f = \frac{6\ \pi\ P \,.\, r^3 \,.\, q}{G \,.\, b \,.\, e^3}$$

3. CAS DU MÉTAL SOLLICITÉ À LA FLEXION

3.1. Ressort à lame plate (fig. IX-5). — Ce type de ressort peut être assimilé à une poutre encastrée sollicitée par une charge P à son extrémité libre : les formules indiquées dans l'étude de la flexion (V. tableau B) sont applicables.

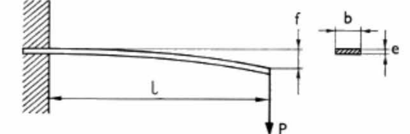


Fig. IX-5

Ressort à lame plate

Le moment fléchissant est : $\mathcal{M}_f = P \,.\, l$ et la contrainte normale correspondante :

$$n = \frac{\mathcal{M}_f}{\frac{I_{\alpha\beta}}{v}} \leqslant R_{pt}$$

Le module de flexion de la section rectangulaire ayant pour valeur :

$$\frac{I_{\alpha\beta}}{v} = \frac{b\ e^2}{6}$$

pour ces ressorts, la condition de sécurité donne donc :

— Charge maximale :

$$P_{\max} \leqslant \frac{b \,.\, e^2}{6 l}\ R_{pt}$$

— Flèche totale correspondante :

$$f = \frac{4\ P \,.\, l^3}{E \,.\, b \,.\, e^3}$$

Le principe de ces ressorts est utilisé dans les ressorts à lames superposées, employés essentiellement pour la suspension des véhicules lourds.

3.2. Ressort spiral (fig. IX-6). — C'est une lame de section rectangulaire, enroulée en spirale : une des extrémités est fixe, et l'autre est solidaire d'un axe sur lequel agit un couple $C = P \cdot r$, avec r, distance de l'axe au point d'application de la charge P.

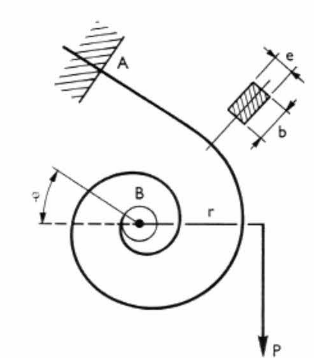


Fig. IX-6

On assimile cette spirale à une lame encastrée soumise au moment fléchissant dû au couple C ; ce moment est constant pour toutes les sections, d'où la contrainte :

$$n = \frac{C}{\frac{I_{\alpha\beta}}{v}} \leqslant R_{pt}$$

et la charge maximale :

$$P_{\max} \leqslant \frac{b \cdot e^2}{6\,r} \cdot R_{pt}$$

Pour la charge P, l'angle φ de rotation de l'axe est égal à :

$$\varphi = \frac{12 \cdot P \cdot l \cdot r}{E \cdot b \cdot e^3}$$

où l est la longueur totale développée de la lame.

3.3. Ressort hélicoïdal. — Les formules du ressort spiral sont applicables, car le couple $C = Pr$ (fig IX-7), comme dans le cas précédent, est constant pour toutes les sections :

1° *Fil de section rectangulaire* (V. fig. IX-7). — Formules identiques au ressort spiral.

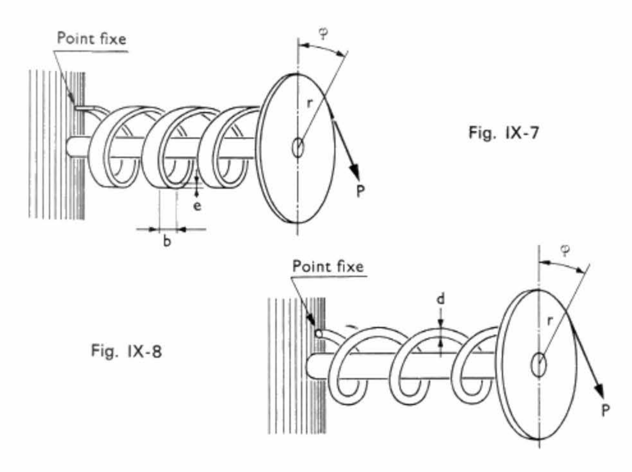


Fig. IX-7

Fig. IX-8

2° *Fil de section circulaire* (fig. IX-8). — Charge maximale :

$$P_{\max} \leqslant \frac{\pi \cdot d^3}{32\,r} R_{pt}$$

Rotation totale de l'axe pour la charge P :

$$\varphi = \frac{32\,P \cdot l \cdot r}{\pi\,E \cdot d^4}$$

4. CARACTÉRISTIQUES D'UN RESSORT

4.1. Courbe caractéristique. — La flèche prise par un ressort est proportionnelle à la charge appliquée P, ainsi que le montrent les formules de déformation : donc, si l'on trace la courbe, appelée courbe caractéristique du ressort, de la charge P en fonction de la flèche f ou de φ (r), on obtient théoriquement une droite pour tous les ressorts étudiés ci-dessus [fig. IX-9, courbe (1)].

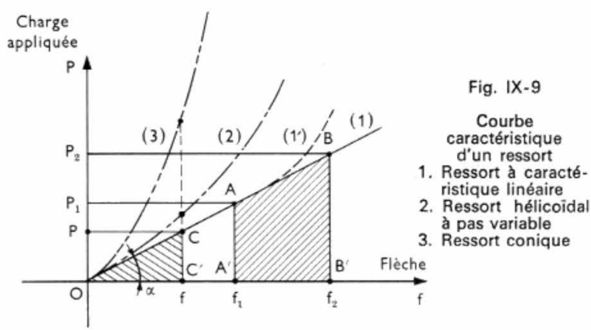


Fig. IX-9

Courbe caractéristique d'un ressort
1. Ressort à caractéristique linéaire
2. Ressort hélicoïdal à pas variable
3. Ressort conique

La *flexibilité* d'un ressort est la flèche par unité de charge : elle est égale au rapport de la flèche à la charge correspondante.

La *raideur* k d'un ressort est égale au rapport inverse ; d'où : $P = k \cdot f$. Sur le graphique de la figure IX-9, on voit que la raideur du ressort k est égale à la pente de la droite caractéristique : $k = \text{tg}\,\alpha$ (à l'échelle près).

Pour des ressorts hélicoïdaux à pas variable et pour des ressorts coniques, on obtient des courbes caractéristiques non linéaires, dites « à flexibilité variable » [fig. IX-9, courbes (2) et (3)].

4.2. Travail absorbé. — Soit les flèches f_1 et f_2 correspondant aux charges P_1 et P_2 : lorsque la flèche passe de f_1 à f_2, le travail absorbé par le ressort est mesuré par l'aire du trapèze $AA'BB'$.

D'une manière générale, le travail absorbé par un ressort, lorsque la flèche passe de la valeur zéro à la valeur f, est mesuré par l'aire du triangle COC'.

Donc, l'énergie emmagasinée de zéro à f a pour expression : $W = \frac{1}{2} P \cdot f$.

Cette énergie est restituée dans le travail de détente.

Pour les ressorts à flexibilité variable, on voit que l'énergie emmagasinée de zéro à f est beaucoup plus grande.

5. RÉALISATION DES RESSORTS

5.1. Extrémités. — À chaque extrémité d'un ressort de compression, la dernière spire est rapprochée et meulée sur 3/4 de circonférence : les extrémités ainsi réalisées constituent des surfaces d'appui planes et bien perpendiculaires à l'axe (V. fig. IX-1 et IX-3). Cette condition est importante pour la stabilité transversale du ressort (V. § 6.1). Ces dernières spires n'interviennent pas dans les calculs : si l'on désigne par q le nombre de spires utiles, le ressort a un nombre total de spires égal à $(q + 1{,}5)$.

5.2. Pas d'enroulement. — Le pas p de l'hélice d'enroulement d'un ressort de compression est pris égal à : $p = d + f_{s\,\max} + \alpha d + \beta r$. Ainsi, sous la charge $P_{\max}$, il n'y a pas de risque de contact entre spires malgré les irrégularités inévitables de d et de p : la courbe caractéristique est effectivement une droite jusqu'à $f_{\max}$. Sans cette précaution, la courbe s'écarterait de la droite suivant le tracé (1') (V. fig. IX-9). En pratique on adopte : $\alpha \geqslant 0{,}05$ et $\beta \geqslant 0{,}04$.

5.3. Précision. — Toutes les formules de flèche précédentes montrent que la flèche est proportionnelle à r^3 et inversement proportionnelle à d^4 (ou $b \cdot e^3$) : les variations inévitables de r et, surtout, de d rendent la réalisation de ressorts de précision délicate et donc onéreuse.

Par ailleurs, cela conduit souvent à faire les calculs par approximations successives pour déterminer les valeurs de r et de d satisfaisant à un problème précis.

6. TYPES PARTICULIERS DE RESSORTS

6.1. Ressorts hélicoïdaux longs. — Pour obtenir des ressorts hélicoïdaux de compression très flexibles, on augmente le nombre de spires utiles q ; ces ressorts présentent une instabilité transversale comparable au flambage des pièces longues (V. ressort intérieur, fig. IX-10) : pour l'éviter, il faut prévoir un guidage intérieur ou extérieur.

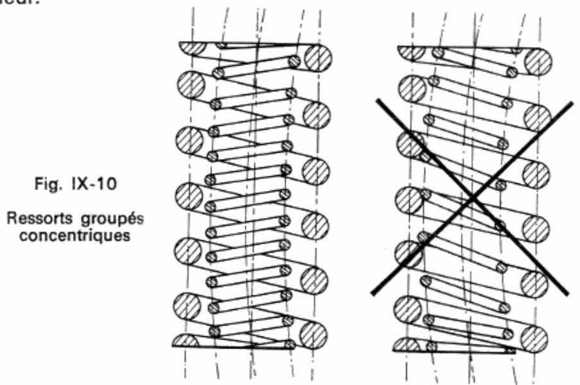


Fig. IX-10
Ressorts groupés concentriques

6.2. Ressorts groupés. — Pour obtenir des valeurs élevées de P_{max}, on est souvent conduit à faire travailler en parallèle plusieurs ressorts dont les charges s'ajoutent. Ainsi, on emploie fréquemment deux ou trois ressorts hélicoïdaux de compression concentriques (fig. IX-10) dont l'encombrement total est réduit. Dans ce cas, il est impératif d'avoir des pas différents et surtout des sens d'enroulement inversés pour assurer un guidage extérieur correct du ressort intérieur, sans possibilité d'imbrication des spires des deux ressorts.

6.3. Ressorts à pas variable. — Ces ressorts de compression sont fréquemment utilisés pour la suspension des véhicules légers : leur propriété antivibratoire est leur qualité essentielle, en plus d'un encombrement réduit [V. fig. IX-9, courbe (2)].

6.4. Ressorts coniques (fig. IX-11). — Leurs spires pénétrant les unes dans les autres, ils ont la propriété

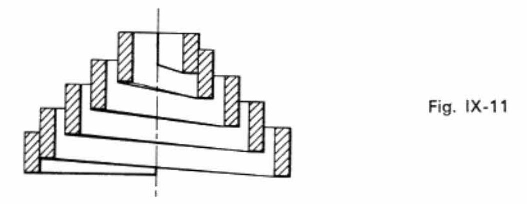


Fig. IX-11

d'absorber une très grande énergie pour un encombrement minimal [V. fig. IX-9, courbe (3)] et sont essentiellement utilisés comme ressorts de choc (tampon de wagon, par exemple). La section, généralement rectangulaire, est souvent décroissante à mesure que le rayon d'enroulement diminue pour réaliser une forme d'égale résistance et de poids minimal.

CHAPITRE X
FLEXION DES PLAQUES

1. GÉNÉRALITÉS

Dans certaines constructions, on rencontre le problème de la résistance des plaques (fig. X-1) : elles sont encastrées sur leur pourtour ou posées sur un appui continu. Les charges peuvent être uniformément réparties, ou concentrées. C'est le cas des fonds de réservoir ou de vérin, des glaces de hublot et des plaques de visite, fixées ou libres.

L'étude suivante est limitée aux plaques circulaires, dont les formules sont simples.

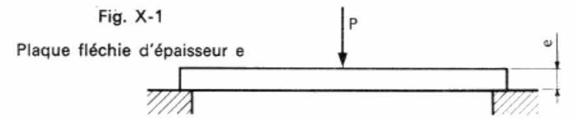


Fig. X-1
Plaque fléchie d'épaisseur e

1.1. Définition d'une plaque. — C'est un corps prismatique, dont l'une des dimensions e, appelée *épaisseur*, est faible par rapport aux deux autres, qui déterminent sa surface.

1.2. Sollicitation. — On envisage uniquement le cas des charges qui agissent transversalement, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface de la plaque. Par analogie avec les poutres droites fléchies, chargées perpendiculairement à leur plus grande dimension, cette sollicitation est appelée *flexion* (V. fig. X-1).

1.3. Plaque plane épaisse. — Elle résiste exclusivement en flexion. Ce qui est toujours le cas d'une plaque simplement appuyée.

Pour une plaque encastrée, cela suppose que l'encastrement comporte un degré de liberté parallèlement au plan de la plaque : il ne s'oppose donc pas aux variations de longueur de la plaque pendant sa déformation (fig. X-2).

Les formules de ce chapitre concernent exclusivement ce type de plaques.

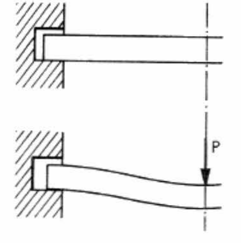


Fig. X-2

1.4. Autres types de plaques. — Une *plaque plane mince* résiste en flexion et aussi en traction grâce aux réactions de l'encastrement qui s'opposent aux variations de sa longueur. Une *membrane plane*, d'épaisseur très faible et de rigidité de flexion négligeable, résiste uniquement en traction. Les formules correspondantes sont complexes : dans les cas courants on assimile une plaque plane mince à une plaque plane épaisse ce qui donne une sécurité plus grande.

2. PLAQUE CIRCULAIRE ENCASTRÉE

2.1. Charge uniformément répartie. — La plaque (fig. X-3) a une épaisseur e faible par rapport à son rayon et supporte une charge uniformément répartie p décanewtons par millimètre carré. Son encastrement satisfait à l'hypothèse du paragraphe 1.3.

On isole un élément de hauteur e, de largeur très petite $d\rho$, correspondant à un secteur d'angle très petit $d\varphi$ et contigu à la section d'encastrement CD. Il est en équilibre sous les actions suivantes : une contrainte normale radiale n_r dirigée suivant un rayon de la plaque, une contrainte normale tangentielle n_t tangente aux circonférences de centre O, et une charge, perpendiculaire au plan de la plaque et relative à l'élément, de valeur $p \, . \, ds$.

En C la contrainte n_r est d'extension. En D la contrainte n_r est de compression. De même, la contrainte n_t est de

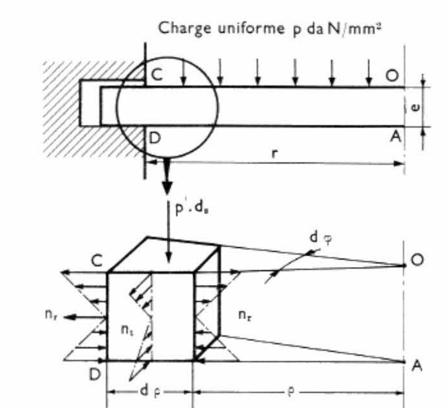


Fig. X-3

Actions sur un élément de plaque

compression en D et d'extension en C : en effet, la continuité de la plaque s'oppose à la contraction (ou à la dilatation) transversale de la partie de l'élément tendue (ou comprimée) par la contrainte principale de flexion n_r.

Dans la section d'encastrement CD, ces contraintes ont pour valeurs :

$$n_{rC} = 0{,}75 \, \frac{pr^2}{e^2}$$

$$n_{tC} = 0{,}22 \, \frac{pr^2}{e^2}$$

En se rapprochant du centre, elles diminuent, s'annulent au cercle de $\mathcal{M}_f$ nul (les courbes $\mathcal{M}_f$, T et f ont la même allure que pour une poutre à deux encastrements avec une charge uniformément répartie : V. tableau B), s'inversent et ont même valeur au centre :

$$n_{rO} = n_{tO} \approx 0{,}50 \, \frac{pr^2}{e^2}$$

En O elles sont de compression et en A d'extension.

La flèche est maximale au centre de la plaque :

$$f_{\max} = A \, \frac{p\,r^4}{E\,e^3} \quad (A = \text{Cte})$$

avec : E module d'élasticité longitudinal du matériau ; A est une constante dépendant du matériau : $A = 0{,}175$ pour les aciers et $A = 0{,}168$ pour l'aluminium et ses alliages.

La plus grande des contraintes est la contrainte normale radiale au droit de l'encastrement : n_{rC} ; la condition de sécurité s'écrit : $n_{rC} \leqslant R_p$. Il faut tenir compte, le cas échéant, de l'élévation de température qui entraîne une diminution de la limite d'élasticité du métal et, dans ce cas, choisir un coefficient de sécurité approprié.

2.2. Charge concentrée autour du centre (fig. X-4 a et b). — À l'encastrement, la contrainte n_r est d'extension en C et de compression en D ; de même, la contrainte n_t est de compression en D et d'extension en C, comme ci-dessus. Elles ont pour valeurs :

$$n_{rC} \approx 0{,}48 \, \frac{P}{e^2}$$

$$n_{tC} \approx 0{,}14 \, \frac{P}{e^2}$$

Au centre de la plaque, la charge P ne s'applique pas en un seul point : pratiquement, elle se répartit sur la périphérie

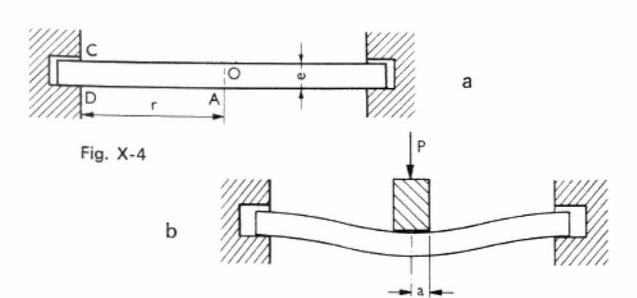


Fig. X-4

d'un cercle de rayon a. Les contraintes sont de compression en O et d'extension en A ; elles valent :

$$n_{rO} = n_{tO} \approx 0{,}62 \, \frac{P}{e^2} \ln \frac{r}{1{,}65\,a}$$

La condition de sécurité s'écrit :

$$n_{rO} \leqslant R_p$$

La flèche maximale est encore au centre :

$$f_{\max} \approx B \, \frac{P\,r^2}{E\,e^3} \quad (B = \text{Cte})$$

La constante B dépend du matériau : $B = 0{,}22$ pour les aciers et $B = 0{,}21$ pour l'aluminium et ses alliages.

Remarque : Dans ce paragraphe la formule de la flèche est valable si $a \leqslant 0{,}07\,r$. Elle donne des valeurs par excès encore acceptables tant que $a < 0{,}15\,r$.

3. PLAQUE CIRCULAIRE APPUYÉE

3.1. Charge uniformément répartie (fig. X-5). — Les contraintes n_r et n_t dans la zone d'appui sont nulles.

Charge uniforme p en décanewtons par millimètre carré

C O e D A r

Fig. X-5

De C à O, la contrainte est de compression ; de D à A, la contrainte est d'extension.

Au centre de la plaque, les contraintes sont maximales :

$$n_{rO} = n_t O = 1{,}23 \, \frac{pr^2}{e^2}$$

D'où, la condition de sécurité : $n_{rO} \leqslant R_p$.

La flèche est maximale au centre :

$$f_{\max} = C \, \frac{pr^4}{Ee^3} \quad (C = \text{Cte})$$

La constante C dépend du matériau : $C = 0{,}73$ pour les aciers et $C = 0{,}68$ pour l'aluminium et ses alliages.

3.2. Charge concentrée autour du centre (fig. X-6). — La charge P est pratiquement répartie sur la périphérie d'un cercle de rayon a et les contraintes sont maximales au centre :

$$n_{rO} = n_{tO} = 0{,}48 \, \frac{P}{e^2} \left(0{,}35 + 1{,}3 \ln \frac{r}{a}\right)$$

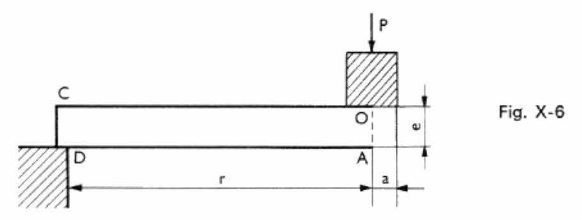


Fig. X-6

Remarque : Cette formule de la contrainte est valable si $a \leqslant 0{,}15\,r$.

De A à O on a une compression et de D à A on a une extension. La flèche est maximale au centre :

$$f_{\max} = D \, \frac{Pr^2}{Ee^3} \quad (D = \text{Cte})$$

La constante D dépend du matériau : $D = 0{,}58$ pour les aciers et $D = 0{,}53$ pour l'aluminium et ses alliages.

Nota : Les formules simplifiées de ce chapitre donnent pour d'autres matériaux, tant que leur coefficient de Poisson est compris entre 0,2 et 0,4, des valeurs approchées acceptables en pratique. Il faut cependant tenir compte de cette imprécision en adoptant un coefficient de sécurité majoré.

CHAPITRE XI

PRESSION DE CONTACT

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Surfaces planes. — Les pressions de contact entre deux surfaces planes égales peuvent être considérées comme une compression uniforme si la charge P est appliquée au centre de gravité de ces surfaces. Sinon, elles se répartissent comme les contraintes de compression dues à une charge excentrée (V. chap. 7 § 6) tant que la charge P s'applique à l'intérieur du noyau central de ces surfaces.

1.2. Surfaces courbes. — Les contraintes et les dimensions de la zone de contact, entre deux surfaces courbes, telles que des dents d'engrenages en prise ou des billes dans un roulement, sont déterminées en fonction de la charge P au moyen des formules de Hertz. Ces formules, établies à partir de la théorie générale de l'élasticité, ne sont applicables que si les hypothèses suivantes sont réalisées :

1° Les contraintes restent inférieures aux limites élastiques des matériaux en contact.

2° Les dimensions de la zone de contact entre les deux surfaces courbes considérées sont faibles par rapport aux rayons de courbure de ces surfaces au point de contact.

2. FORMULES DE HERTZ

Elles se mettent sous une forme simple dans les cas particuliers usuels ci-après. Les coefficients numériques indiqués sont utilisables pour des matériaux dont le coefficient de Poisson est inférieur à 0,3 (aciers, alliages d'aluminium et alliages de cuivre).

Si les matériaux en contact sont différents, la valeur de E' à adopter pour appliquer ces formules est celle d'un module fictif calculé au moyen de la relation suivante :

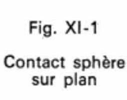
$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)$$

où : E_1 et E_2 sont les modules d'élasticité longitudinale respectifs des matériaux en contact.

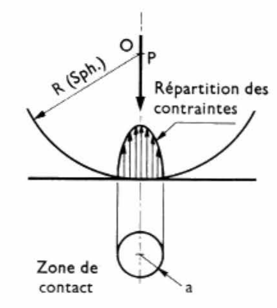
2.1. Contact sphère sur plan (fig. XI-1). — La zone de contact des deux pièces, où la contrainte de compression est inégalement répartie, est un cercle dont le rayon a est égal à :

$$a = 1,15\sqrt[3]{\frac{PR}{E'}}$$

si R représente le rayon de la sphère.


Fig. XI-1

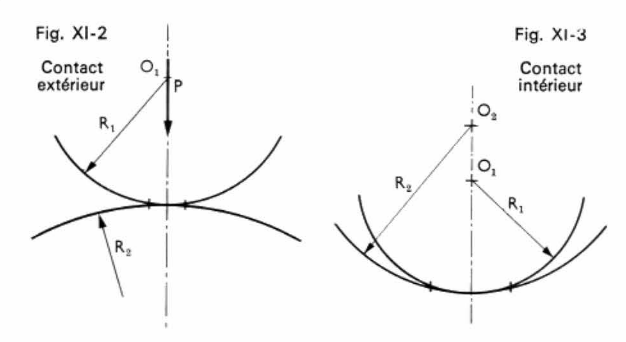
Contact sphère sur plan



La contrainte de compression est maximale au centre du cercle, où elle a pour valeur :

$$n_{\max} = 0,36\sqrt[3]{\frac{PE'^2}{R^2}}$$

2.2. Contact sphère sur sphère (fig. XI-2 et XI-3). — Les relations précédentes sont applicables en prenant pour



R la valeur donnée par les relations suivantes, où R_1 et R_2 représentent les rayons des sphères en contact :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

pour un contact extérieur (fig. XI-2),

et :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$$

pour un contact intérieur (fig. XI-3) avec $R_1 < R_2$.

2.3. Contact cylindre sur plan (fig. XI-4). — La déformation élastique donne, comme zone de contact, un rectangle de largeur b donnée par la formule :

$$b = 2,26\sqrt[2]{\frac{PR}{LE'}}$$

en appelant le rayon du cylindre R et la longueur du cylindre L.

La contrainte de compression est maximale sur la génératrice inférieure du cylindre, où elle a pour valeur :

$$n_{\max} = 0,56\sqrt[2]{\frac{PE'}{LR}}$$

2.4. Contact cylindre sur cylindre (V. fig. XI-2 et XI-3). — Il s'agit exclusivement de cylindres dont les axes sont parallèles. On utilise la relation donnée ci-dessus (cylindre sur plan) en prenant pour R les valeurs définies au paragraphe 2.2, R_1 et R_2 étant les rayons des cylindres en contact.

Unités : On exprime a, b, R, R_1, R_2 et L en millimètres, P en décanewtons, E', E_1, E_2 et $n_{\max}$ en décanewtons par millimètre carré.

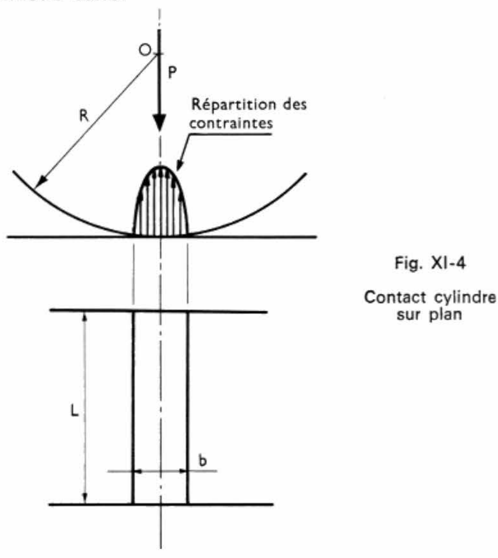


Fig. XI-4

Contact cylindre sur plan

FORMULAIRE GÉNÉRAL DE RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

Le tableau ci-après regroupe les formules utilisées dans l'article de la résistance des matériaux et relatives aux principales sollicitations simples et composées. *Nota :* Pour toute formule (autre que la première) la signification d'un symbole n'est indiquée que si elle est différente de celle qu'il avait dans la formule qui précède ou si ce symbole n'a pas encore été cité.

Sollicitation	Condition de sécurité	Déformation	Symboles
Extension	$n = \frac{N}{S} \leqslant R_{pt}$	$\Delta L = \frac{1}{E} \cdot \frac{N}{S} \cdot L$	n contrainte normale N effort de traction S section droite de la pièce L longueur de la pièce E module d'élasticité longitudinale (module de Young) R_{pt} contrainte admissible à l'extension
Compression (pièces courtes)	$n = \frac{N}{S} \leqslant R_{pc}$	$\Delta L = \frac{1}{E} \cdot \frac{N}{S} \cdot L$	N effort de compression R_{pc} contrainte admissible à la compression
Cisaillement simple	$t = \frac{T}{S} \leqslant R_{pg}$	$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \frac{T}{S}$	t contrainte tangentielle T effort tranchant G module d'élasticité transversale (module de Coulomb) ($G \approx 0{,}4\ E$ pour les métaux) γ angle de déviation R_{pg} contrainte admissible au cisaillement
Flexion plane simple	$n = \frac{\mathcal{M}_{f\max}}{\frac{I_{\alpha\beta}}{v}} \leqslant R_p$	$y'' = \frac{1}{r} = \frac{d^2y}{dx^2}$ $\frac{1}{r} = \frac{\mathcal{M}_f}{E \cdot I_{\alpha\beta}}$	$\mathcal{M}_{f\max}$ moment fléchissant maximal $I_{\alpha\beta}$ moment quadratique de la section par rapport à l'axe neutre $\alpha\beta$ v distance de la fibre la plus éloignée de l'axe neutre $\alpha\beta$ $\frac{I_{\alpha\beta}}{v}$ module de flexion de la section R_p contrainte admissible à l'extension (ou à la compression) y'' dérivée seconde de la déformée $y = f(x)$ r rayon de courbure de la déformée au point d'abscisse x $\mathcal{M}_f$ moment fléchissant dans la section d'abscisse x
Torsicn plane	$t = \frac{\mathcal{M}_t}{\frac{I_0}{v}} \leqslant R_{pg}$	$\alpha = \frac{\mathcal{M}_t}{G \cdot I_0} \cdot L$	$\mathcal{M}_t$ moment de torsion I_0 moment quadratique polaire de la section $\frac{I_0}{v}$ module de torsion $v = \frac{d}{2}$ pour un cylindre $\left(\frac{I_0}{v} \approx 0{,}2\ d^3\right)$ α angle total de torsion

FORMULAIRE GÉNÉRAL DE RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX (suite)

Sollicitation	Condition de sécurité	Symboles
Flexion et extension (ou compression)	$n_{1\,max} \pm n_2 \leqslant R_p$	$n_{1\,max}$ contrainte normale due à la flexion seule n_2 contrainte normale due à l'extension (ou à la compression) seule
Torsion et extension (ou compression)	$\sqrt{n^2 + 4\,t^2} \leqslant R_p$	n contrainte normale due à l'extension (ou à la compression) seule t contrainte tangentielle due au moment de torsion seul
Flexion et torsion	Matériaux fragiles $\mathcal{M}_{fi} = \frac{1}{2}\mathcal{M}_f + \frac{1}{2}\sqrt{\mathcal{M}_f^2 + \mathcal{M}_t^2} \leqslant \frac{I_{\alpha\beta}}{v} \cdot R_p$ Matériaux ductiles $\mathcal{M}_{ti} = \sqrt{\mathcal{M}_f^2 + \mathcal{M}_t^2} \leqslant \frac{I_0}{v} \cdot R_{pg}$	$\mathcal{M}_{fi}$ moment de flexion idéal $\mathcal{M}_f$ moment fléchissant dû à la flexion seule $\mathcal{M}_t$ moment de torsion dû à la torsion seule $\mathcal{M}_{ti}$ moment de torsion idéal
Flexion déviée simple	$\mathcal{M}_{max}\left(\frac{X \sin\alpha}{I_{y'y}} + \frac{Y \cos\alpha}{I_{x'x}}\right) \leqslant R_p$	$\mathcal{M}_{max}$ moment fléchissant maximal dans la section $I_{y'y}$ moment quadratique par rapport à l'axe de symétrie $y'y$ $I_{x'x}$ moment quadratique par rapport à l'axe de symétrie $x'x$ α angle formé par l'axe $x'x$ avec le plan horizontal X et Y coordonnées du point le plus éloigné de l'axe neutre
Compression sous charge excentrée	$n_1 + n_2 \leqslant R_p$	N charge excentrée n_1 contrainte normale due à $\mathcal{M}_f$ (N) n_2 contrainte normale due à N
Flambage (si $\lambda > 8$)	Formule d'Euler si : $\lambda \geqslant \lambda_e = \pi\sqrt{\frac{E}{R_{ec}}}$ soit $\lambda > 80$ (fonte), $\lambda > 95$ (bois), $\lambda > 110$ (acier doux) $P_c = \frac{\pi^2 E\, I_{\alpha\beta}}{l^2}$ $\frac{P_c}{S} = n_{cE} \leqslant R_{ec}$ $n = \frac{N}{S} \leqslant n_{aE} = \frac{n_{cE}}{s_1}$	λ élancement de la pièce $\lambda = \frac{l}{\rho}$ ρ rayon de giration $\rho = \sqrt{\frac{I_{\alpha\beta}}{S}}$ R_{ec} limite élastique à la compression P_c charge critique (Euler) l longueur libre au flambage n_{cE} contrainte critique de flambage (Euler) n_{aE} contrainte admissible (Euler) s_1 coefficient de sécurité

FORMULAIRE GÉNÉRAL DE RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX (suite)

Sollicitation	Condition de sécurité	Symboles	
Flambage (si $\lambda > 8$) (suite)	Formule de Rankine si $\lambda < \lambda_e$ $n_{cR} = \dfrac{R_{ec}}{1 + \dfrac{R_{ec}}{\pi^2 E}\lambda^2}$ $n = \dfrac{N}{S} \leqslant n_{aR} = \dfrac{n_{cR}}{s_2}$	n_{cR} n_{aR} s_2	contrainte critique de flambage (Rankine) contrainte admissible (Rankine) coefficient de sécurité

CHAPITRE XII

MATÉRIAUX PARTICULIERS

1. GÉNÉRALITÉS

Aucun matériau n'est parfaitement conforme aux hypothèses de base de la résistance des matériaux (V. chap. 1 § 2).

La plupart s'en écartent peu : les conditions d'équilibre des constructions, calculées à partir de ces hypothèses, donnent une sécurité suffisante.

Quelques matériaux s'en écartent beaucoup : leur emploi impose des méthodes de calcul particulières dont l'essentiel est donné ci-après.

2. MATÉRIAUX ANISOTROPES

2.1. Bois. — Faits de canaux creux contigus, ils ont des propriétés mécaniques différentes pour des contraintes normales parallèles à ces canaux et pour des contraintes normales perpendiculaires (V. chap. 2, tableau A : chêne en long et en travers).

En outre (fig. XII-1 a), la limite élastique à la compression « en long » est inférieure à la *contrainte apparente* calculée par les formules de flexion pour des *charges réelles* d'utilisation. De même, la résistance à la compression R_c est plus petite que R_{ca}, *résistance apparente* à la compression déduite de l'essai de flexion.

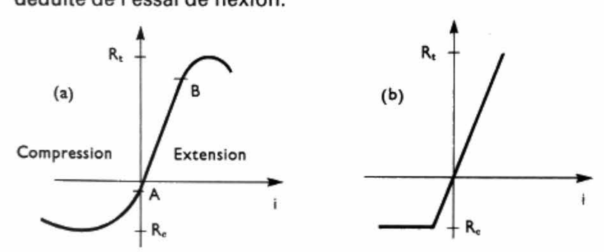


Fig. XII-1 — Courbe contrainte-déformation des bois en long ; (a) réelle ; (b) théorique

Une hypothèse du physicien Prager, confirmée par de nombreux essais, assimile la courbe contrainte-déformation à des segments de droites (fig. XII-1 b) et conduit, dans la section de rupture par flexion d'une poutre rectangulaire, à un diagramme de répartition réelle des contraintes tronqué et décalé par rapport à la *répartition apparente* de la flexion simple donnant R_{ca} (fig. XII-2).

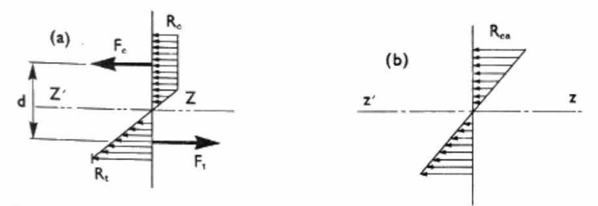


Fig. XII-2 — Répartition des contraintes dans la section de rupture par flexion d'une poutre rectangulaire en bois ; (a) réelle ; (b) apparente

Le moment fléchissant maximal correspondant a pour valeur :

$$\mathcal{M}_{f\max R} = F_t \, . \, d = R_{ca} \, . \, \frac{I_{\alpha\beta}}{v}$$

où : $\quad F_t = \Sigma n_t \, dS = \Sigma n_c \, dS = F_c$

À partir de cette équation, en posant :

$$k = \frac{R_{ca}}{R_c}, \text{ et : } \gamma = \frac{R_t}{R_c}$$

le calcul définit une fonction : $k = f(\gamma)$, caractéristique du type de la section (rectangulaire, ronde, en I, en T).

Les essais de compression et d'extension donnent pour chaque essence de bois R_c et R_t, d'où : γ, dont on déduit k suivant le type de section de la poutre considérée.

On obtient le moment fléchissant maximal admissible en divisant le moment maximal *à la rupture* (et non pas à la limite élastique) par s', *coefficient de sécurité à la rupture* dont la valeur est comprise entre 6 et 12 ; d'où la condition de sécurité :

$$\mathcal{M}_{f\max} \leqslant \frac{1}{s'} \, . \, \mathcal{M}_{f\max R} = \frac{1}{s'} \, . \, k \, . \, R_c \, . \, \frac{I_{\alpha\beta}}{v}$$

Remarque : on ne peut pas calculer les contraintes correspondant à une charge déterminée.

2.2. Nid d'abeilles (fig. XII-3). — Deux tôles reliées par des tôles fines gaufrées et associées par brasure composent un matériau dont les propriétés mécaniques et les techniques de calcul sont comparables à celles des bois : réalisé en acier inoxydable, très léger, il remplace l'aluminium lorsque la température de fonctionnement en interdit l'emploi (applications aérospatiales).

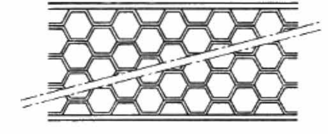


Fig. XII-3 Coupe d'un nid d'abeilles

3. MATÉRIAUX HÉTÉROGÈNES

3.1. Béton armé. — L'association fer-béton, possible grâce à leurs coefficients de dilatation très voisins, est ininflammable : cette qualité et la facilité de mise en œuvre ont favorisé son développement initial. En outre, le béton adhère au fer, ne l'attaque pas et le protège de la corrosion.

De plus, à l'extension (V. fig. XII-4 a), la résistance à la rupture du béton non armé, égale à la limite élastique, est beaucoup plus petite qu'à la compression : c'est un matériau fragile et dangereux s'il travaille à l'extension et surtout à la flexion sous l'action de charges dynamiques.

Pour le béton armé (V. fig. XII-4 b), la présence d'armatures longitudinales (1 à 3 % de la section), sans influence sur les autres caractéristiques, augmente plus de dix fois l'allongement, à contrainte constante, avant la rupture par extension.

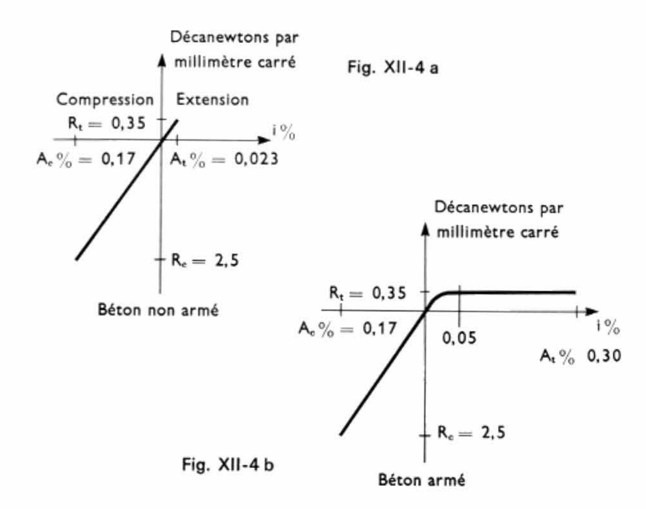


Fig. XII-4 a

Fig. XII-4 b

Poutre fléchie. — Dans la partie tendue, cette propriété permet de faire travailler l'armature à la contrainte admissible de l'acier doux en dépassant la limite élastique du béton armé mais sans dépasser le cinquième de son allongement avant rupture car, liés par l'adhérence, les deux matériaux ont le même allongement, soit :

$$i_B = i_A = \frac{R_{pA}}{E_A} = \frac{12}{22\,000} \approx 0{,}05\ \%$$

Cela donne une sécurité suffisante dans les cas usuels de charges *statiques* où une légère déformation permanente du béton tendu est admissible.

On allège les calculs en négligeant le béton tendu dont l'influence est minime ; avec les notations de la figure XII-5 a et en posant : $m = \frac{E_A}{E_B} \approx 15$, le diagramme simplifié des déformations donne dans la section de moment fléchissant maximal :

$$y = \frac{m \, . \, R_{pc\,B}}{R_{pA} + m \, . \, R_{pc\,B}} \, . \, h$$

$$F_B = \frac{by}{2} \, . \, R_{pc\,B} = F_A = \omega_t \, . \, R_{pA}$$

d'où la section de l'armature tendue :

$$\omega_t = \frac{by}{2} \, . \, \frac{R_{pc\,B}}{R_{pA}}$$

et la condition de sécurité :

$$\mathcal{M}_{f\,\max} \leqslant F_A \, . \, d = F_A \left(h - \frac{y}{3}\right)$$

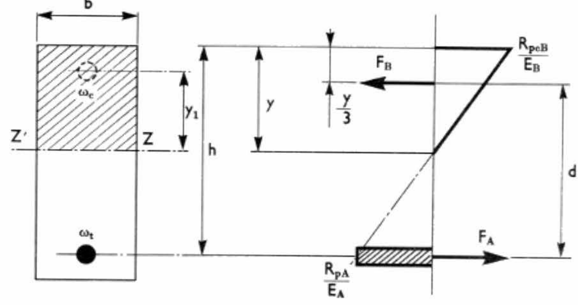


Fig. XII-5 a — Poutres fléchies : diagramme simplifié des déformations

On peut augmenter $\mathcal{M}_{f\,\max}$ en prenant ω_t plus grand et en équilibrant la différence $F_A - F_B$ par une armature comprimée de section :

$$\omega_c = \frac{1}{m} \, . \, \frac{y}{y_1} \, . \, \frac{F_A - F_B}{R_{pc\,B}}$$

Pour gagner du poids, les poutres font corps avec la dalle qu'elles supportent : on constitue ainsi une poutre en T moins haute et plus légère, plus résistante et moins chargée (fig. XII-5 b).

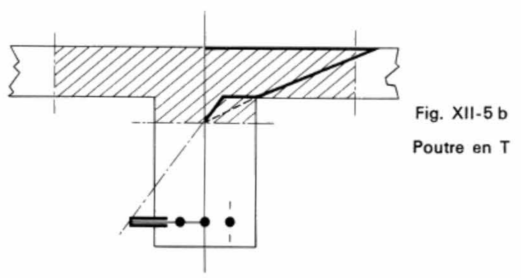


Fig. XII-5 b

Poutre en T

Des étriers verticaux, espacés en raison inverse de l'effort tranchant, supportent le cisaillement correspondant et maintiennent les armatures longitudinales pendant la coulée du béton (fig. XII-6). Au voisinage des appuis

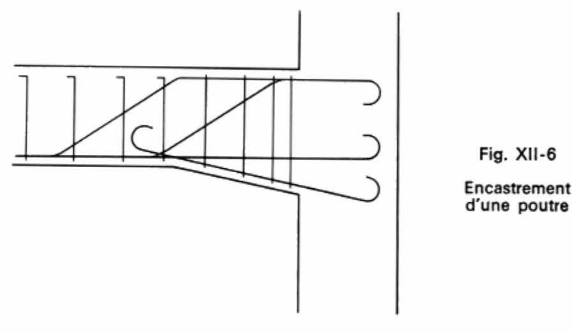


Fig. XII-6

Encastrement d'une poutre

encastrés, il faut renforcer les sections de béton et d'acier et, de plus, faire passer une partie des armatures inférieures dans le haut de la poutre, qui est tendue.

L'adhérence du béton sur les armatures, améliorée par l'emploi de ronds crénelés, est complétée par des crochets d'extrémités.

Pièce en extension. — Seule la section ω des armatures doit être prise en compte, d'où la condition de sécurité :

$$N \leqslant \omega \, . \, R_{pA}$$

Il faut prévoir une section de béton supérieure à 30 ω (jusqu'à 60 ω) pour éviter les fissurations et assurer la protection des armatures.

Pièce comprimée. — Les deux matériaux travaillent avec le même allongement, d'où la condition de sécurité pour les pièces courtes :

$$N \leqslant (S_B + m \, . \, \omega) \; R_{pc\,B}$$

Si la longueur dépasse six fois le diamètre (ou la plus petite des dimensions transversales), il faut calculer la pièce au flambage (V. chap. 8) avec : $S = S_B + m \, . \, \omega$ et : $I = I_B + m \, . \, I_A$. La formule d'Euler n'est applicable que pour des élancements $\lambda > 65$, qui sont exceptionnels.

3.2. Béton précontraint. — Malgré ses qualités, le béton armé est très lourd et l'emploi d'acier à hautes caractéristiques n'apporte aucun avantage car c'est le comportement du béton tendu qui détermine la contrainte admissible dans les armatures ; aussi la part du poids propre d'une poutre dans sa charge admissible est-elle importante. Elle devient même prépondérante pour des charges *dynamiques*, cas où la condition de sécurité dépend de la *contrainte admissible* et non plus de l'allongement admissible du béton tendu. Enfin, le béton armé résiste très mal aux contraintes alternées qui provoquent des fissures préjudiciables à la protection des armatures.

La technique du béton précontraint supprime ces inconvénients car le béton subit exclusivement des contraintes de compression : la *poutre en béton* est sollicitée, d'une part, en flexion par son poids et sa charge, d'autre part, en compression excentrée par un câble de précontrainte. Ce câble, coulissant dans une gaine, est indépendant du béton et tendu uniquement par ses ancrages aux extrémités de la poutre. Sa position dans chaque section est telle que, pour le béton, la contrainte maximale de compression correspondante soit égale ou supérieure à la contrainte maximale d'extension due au moment fléchissant. Cette sollicitation

composée (flexion et compression excentrée) se calcule avec les éléments donnés au chapitre 7 § 2 et 6.

L'emploi d'aciers de contrainte admissible importante ($R_{p\,A} \geqslant$ 80 daN/mm²), de béton à haute résistance ($R_{pc\,B} \geqslant$ 1,5 daN/mm²) et de sections en I, à grand module de flexion, donnent des poutres légères : elles peuvent être préfabriquées industriellement, puis transportées et mises en place à l'aide des puissants moyens de manutention modernes.

3.3. Plastiques renforcés. — Des fibres de verre, de graphite ou de bore, noyées dans une matière plastique qui les lie entre elles, constituent des matériaux légers ayant de bonnes caractéristiques mécaniques.

Si les fibres sont courtes et réparties dans toutes les directions, le matériau est isotrope et ses caractéristiques mécaniques permettent le calcul des pièces. C'est le cas du stratifié verre-résine utilisé pour les toits de voiture de tourisme ou les doubles coques de bateaux reliées d'ailleurs par un nid d'abeilles de même nature.

Si les fibres sont continues et orientées, le matériau est anisotrope. Tels sont les stratifiés à renforcement unidirectionnel et les stratifiés à couches croisées, appelés composites à haute résistance. Les pales de rotor d'hélicoptère, les réservoirs sous pression et les ailes d'avion de chasse supersonique (plus légères et plus résistantes que celles en aluminium et titane), construits avec ces composites, se calculent par des méthodes basées essentiellement sur l'hypothèse de l'égalité des déformations élastiques des deux constituants.

TECHNOLOGIE
CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

ÉTUDE DES CONSTRUCTIONS

CHAPITRE PREMIER

ASSEMBLAGES À LIAISON COMPLÈTE

Toute machine ou appareil est constitué de pièces assemblées, certaines fixes, d'autres mobiles et devant être réunies aux pièces fixes par des assemblages qui les guident dans leurs déplacements. Les nécessités de fabrication, de montage, de transport et de réparation obligent à concevoir un certain nombre d'organes de la machine en plusieurs pièces. Les assemblages qui les associent dépendent de nombreux facteurs : nature de la liaison, grandeur des efforts appliqués et forme de ces pièces. Par ailleurs, une construction mécanique est sujette aux avaries et à l'usure : certaines de ses parties devront donc pouvoir être démontées, sans détériorer les pièces assemblées, pour être remplacées ou réparées. D'autres, qui en constituent la charpente (châssis de voiture, bâtis de machine), pourront, au contraire, être assemblées de façon définitive.

Cela a conduit à considérer deux catégories d'assemblages : les assemblages à liaison permanente et les assemblages à liaison démontable.

La première catégorie comprend principalement les assemblages par rivetage, par soudure et par collage. Seule l'étude du rivetage est faite ci-après, la soudure et le collage étant étudiés par ailleurs. Dans la deuxième catégorie, on étudiera les assemblages par vis, boulons et clavettes.

1. ASSEMBLAGES À LIAISON PERMANENTE PAR RIVETS

1.1. Généralités. — Le *rivetage* permet d'obtenir un assemblage rigide et invariable de deux ou plusieurs pièces par un élément de liaison appelé *rivet* et constitué par une tige métallique cylindrique munie d'une tête (fig. I-1 a) : lorsqu'il est mis en place dans les trous des pièces à assembler, la partie opposée à la tête est refoulée pour former une deuxième tête, appelée *rivure*. Un tel assemblage ne peut être démonté que par destruction de la tête ou de la rivure.

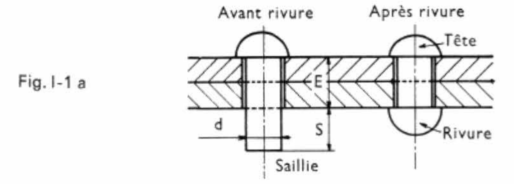


Fig. I-1 a

Le rivetage est particulièrement employé pour l'assemblage de tôles, méplats ou profilés (en acier, en alliages d'aluminium ou de cuivre) utilisés dans la construction aéronautique, dans la construction des chaudières, des carènes de navires, des ponts, des charpentes métalliques, etc.

On peut avoir quelquefois à assembler des tôles en acier sur un support cassant (en fonte) : dans ce travail délicat, la rivure sera toujours exécutée côté tôle.

Le rivetage des rivets en acier se fait à froid lorsque le diamètre d de la tige du rivet est inférieure à 10 mm. Si d est supérieur à 10 mm, il est réalisé à chaud (rivet chauffé au rouge vif, à 900 °C).

On façonne la rivure avec une *bouterolle* (outil présentant une empreinte, dont la rivure prendra la forme) sur laquelle on frappe avec un marteau à main ou avec un marteau pneumatique (fig. I-1 b). Pour les gros diamètres,

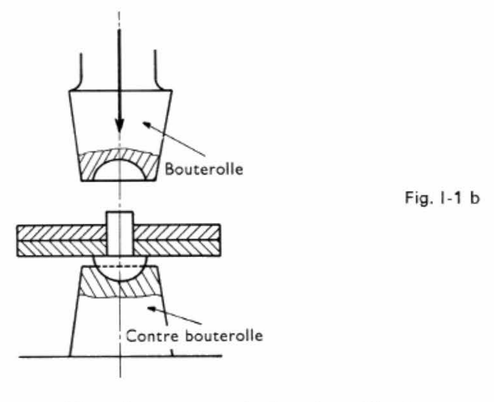
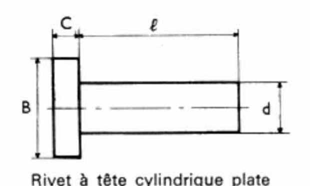


Fig. I-1 b

on utilise des presses à river travaillant par pression progressive. Pendant la formation de la rivure, le rivet est maintenu par une *contre-bouterolle* dont l'empreinte coïncide avec la forme de sa tête.



Rivet à tête cylindrique plate
Symbole C

Fig. I-2

Rivet à tête ronde
Symbole R

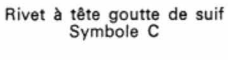
Rivet à tête ronde
avec arrondi sous tête
Symbole Ra

Rivet à tête ronde avec bavure et
arrondi sous tête
Symbole Rb

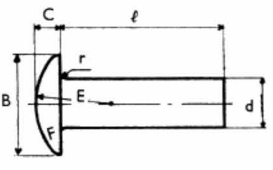
Fig. I-4

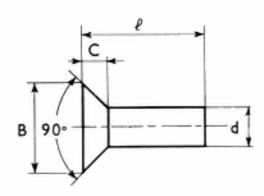


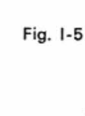
Fig. I-3



Rivet à tête goutte de suif
Symbole C

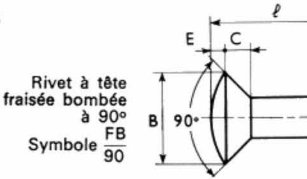






Rivet à tête
fraisée à 90°
Symbole $\frac{F}{90}$

Fig. I-5



Rivet à tête
fraisée bombée
à 90°
Symbole $\frac{FB}{90}$

1.2. Rivets en acier

1.2.1. Formes et dimensions. — Ces rivets sont en acier doux (résistance à la rupture $R \approx 40$ daN/mm²) ; ils diffèrent par la forme de leurs têtes.

— *Forme de la tête.* — On utilise les formes suivantes (normes NF E 27-151 à 154) : tête cylindrique plate, pour la petite tôlerie (fig. I-2) ; tête goutte de suif pour les rivures d'étanchéité (fig. I-3) ; tête ronde pour les constructions de chaudières et, en grosse chaudronnerie, pour les rivures d'étanchéité (fig. I-4) ; tête fraisée à 90° pour la charpente et la construction navale, aux endroits où tout dépassement doit être évité (fig. I-5).

— *Diamètre de la tige.* — Fonction de l'épaisseur des tôles à assembler, il varie suivant la destination de l'assemblage et il est choisi dans la série ISO des filetages (V. § 2).

— *Saillie.* — La saillie *s*, dépassement de la tige du rivet, une fois celui-ci mis en place et avant formage de la rivure, dépend de la forme de la rivure et de la méthode de rivetage. En général : $s = 1{,}5\,d + \frac{E}{10}$ (pose à la machine) et $s = 1{,}5\,d + \frac{E}{20}$ (pose à la main), E étant l'épaisseur totale à assembler et d représentant le diamètre de la tige du rivet. La longueur totale l du rivet est supérieure ou égale à $E + s$. Pour obtenir un refoulement uniforme du rivet sur toute sa longueur, on doit avoir : $L \leqslant 3{,}5\,d$. Les longueurs normalisées sont les mêmes que celles des vis.

— *Forme de la rivure.* — Elle peut être identique à la forme de la tête du rivet ou avoir la forme de l'une des têtes définies précédemment.

1.2.2. Calcul des rivets. — Un ensemble de pièces rivées doit se comporter comme une pièce monobloc : les rivets doivent résister aux mêmes efforts que les tôles qu'ils assemblent et avec un coefficient de sécurité comparable.

— *Rivetage à chaud.* — Après refroidissement, la contraction du rivet provoque un effort de serrage qui établit une adhérence entre les tôles, s'opposant à leur déplacement relatif. Dans la pratique, on admet que cette adhérence peut être insuffisante par suite des vibrations et des chocs. *On considère alors les rivets comme travaillant uniquement au cisaillement ;* si l'assemblage comporte n rivets (fig. I-6) et supporte un effort F, on doit avoir (V. Résistance des matériaux, chap. 4) :

$$\frac{F}{n\frac{\pi\,d^2}{4}} \leqslant R_{pg} \quad (R_{pg} = 6 \text{ à } 8 \text{ daN/mm}^2)$$

Fig. I-6

Dans le cas d'un assemblage de trois tôles, l'effort se répartit sur deux sections du rivet (fig. I-7) et la formule devient :

$$\frac{F}{2\,n\frac{\pi\,d^2}{4}} \leqslant R_{pg}$$

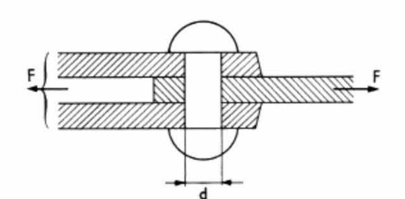
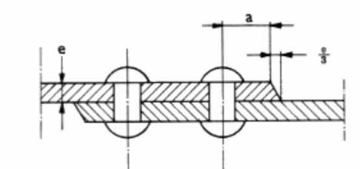
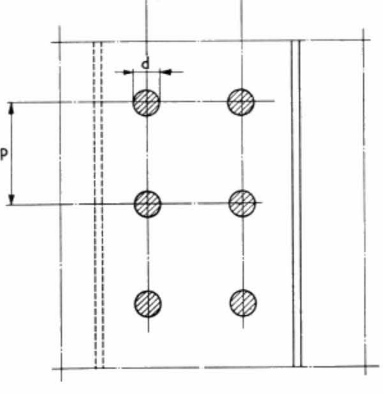


Fig. I-7

— *Rivetage à froid.* — On considère les rivets comme travaillant au cisaillement par suite des irrégularités de pose et les formules sont les mêmes.

1.3. Mode d'assemblage des tôles en acier. — Il est fonction de la forme des pièces à assembler et de leur destination. L'assemblage est dit à *recouvrement* (ou à *clin*) lorsque les tôles peuvent se superposer. Les rivets sont placés sur un, deux ou trois rangs et disposés en ligne (fig. I-8) ou en quinconce (fig. I-9). Lorsque les tôles ne se recouvrent pas, l'assemblage est dit à *couvre-*





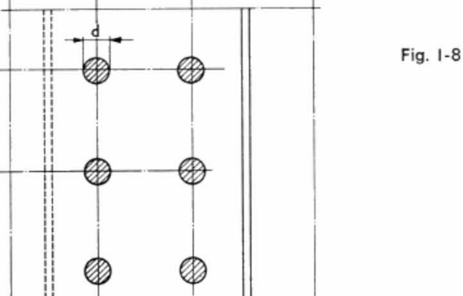


Fig. I-8

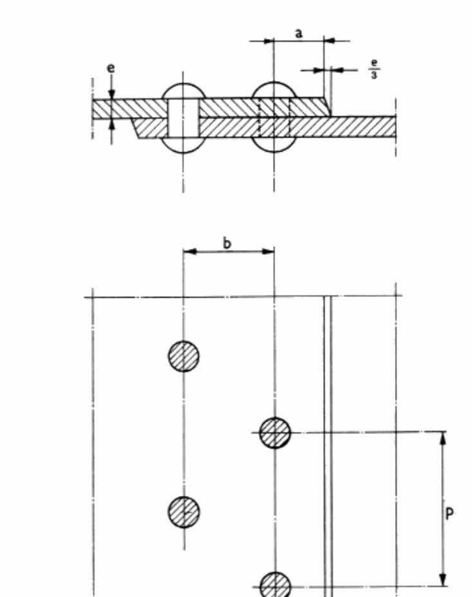


Fig. I-9

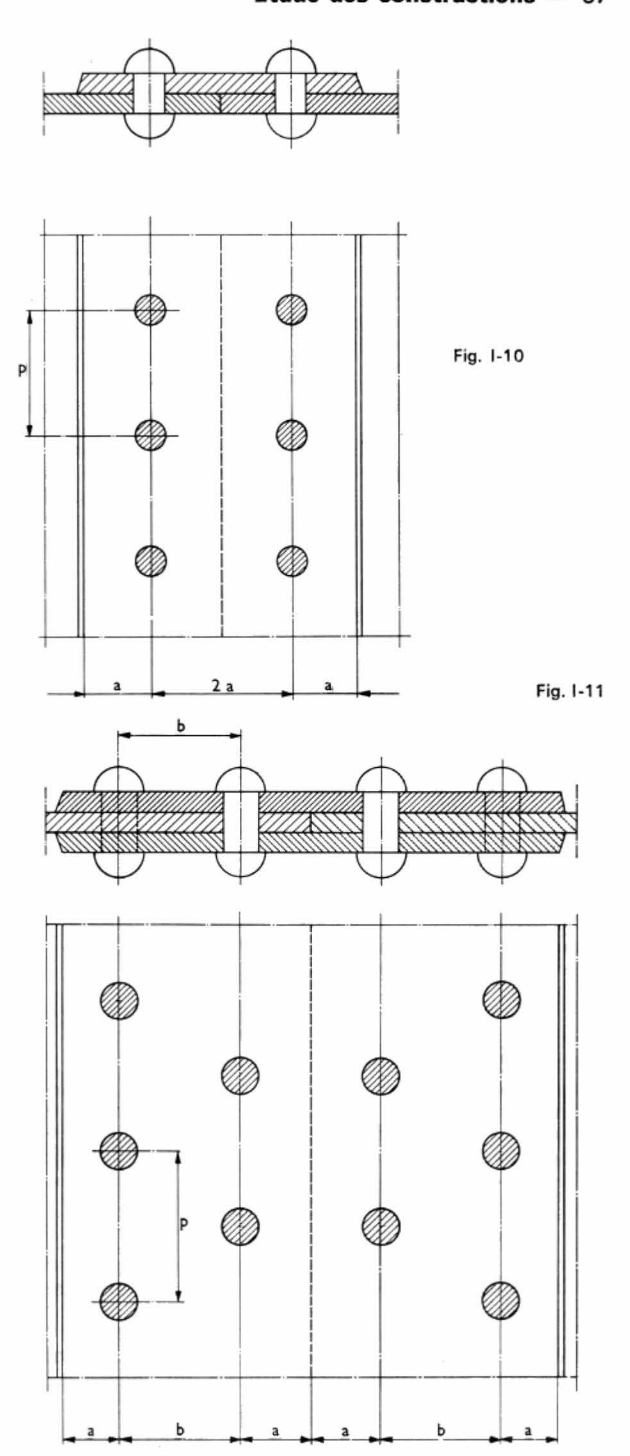


Fig. I-10

Fig. I-11

joint simple (fig. I-10) ou à *couvre-joint double* (fig. I-11) suivant qu'il y a une ou deux tôles de jonction. On appelle *p le pas* entre deux rivets consécutifs d'un même rang, *a la pince* de l'axe des rivets au bord de la tôle et *b l'écartement* entre deux rangs de rivets.

— *Diamètre de perçage des tôles.* — Le trou est légèrement plus grand que la tige du rivet, soit en général: $d + 0{,}25$ mm (pour $d < 5$ mm), $d + 0{,}5$ mm (pour 5 mm $< d <$ 10 mm) et $d + 1$ mm ou 2 mm (pour $d > 10$ mm).

— *Épaisseur des tôles.* — Le rivetage affaiblissant les tôles, un coefficient β intervient dans le calcul de ces dernières:

$$e = \frac{F}{l\,\beta\,R_p} + \alpha$$

avec: e, épaisseur de la tôle en millimètres; α, surépaisseur d'usure et d'oxydation en millimètres; l, largeur de la tôle en millimètres; F effort supporté; R_p, résistance pratique du métal en décanewtons par millimètre carré.

Dans les assemblages à recouvrement ou à couvre-joint simple, on adopte $\beta = 0{,}5$ pour un rang de rivets, 0,62 pour deux rangs et 0,75 pour trois rangs; dans ceux à couvre-joint double, $\beta = 0{,}65$ pour un rang, 0,75 pour deux et 0,85 pour trois.

1.4. Différents rivetages. — Suivant les conditions demandées à l'assemblage, on distingue trois catégories de rivetages pour les tôles en acier.

1.4.1. Rivetages de force. — En charpente métallique, ponts, etc., seule la résistance de l'assemblage est à considérer. On utilise des rivets à têtes rondes, fraisées ou fraisées bombées. Le diamètre de la tige est fonction de l'épaisseur à assembler. On adopte: $1{,}5\,e < d < 2\,e$, e étant l'épaisseur de la tôle la plus forte; $3\,d < p < 7\,d$; $1{,}5\,d < a < 2\,d$; $b = 3\,d + 20$ pour les rivetages en ligne et $b = 2{,}5\,d + 16$ pour les rivetages en quinconce.

1.4.2. Rivetages d'étanchéité. — Dans la construction des réservoirs basse pression, bacs, etc., les rivetages d'étanchéité sont généralement à clin à simple rangée. On adopte: $d \approx 2\,e + 3$ et $p \leqslant 3\,d$, pour assurer une adhérence convenable des tôles entre elles. Si e est supérieur à 5 mm, on accroît l'étanchéité par matage du chanfrein du bord de la tôle. Pour les tôles minces, on intercale entre elles un joint (papier, carton ou toile), le rapprochement des rivets n'assurant pas l'étanchéité. Dans le cas d'assemblage à couvre-joint double, ceux-ci ont une épaisseur de 0,5 e.

1.4.3. Rivetages mixtes. — Les rivets assurent à la fois la résistance et l'étanchéité de l'assemblage dans la construction des corps de chaudières et des réservoirs sous pression. Généralement à tête ronde à bavure, ils doivent être suffisamment rapprochés pour éviter que la tôle bâille et la pince doit être petite pour que le matage soit efficace. L'étanchéité du rivet lui-même est obtenue par l'utilisation d'une bouterolle à bord aigu qui réalise un matage de la bavure de la tête.

En pratique, on prend: $d = \sqrt{50\,e} - 4$; $a = 1{,}5\,d$; $1{,}6\,d < b < 1{,}8\,d$; $2{,}5\,d < p < 3{,}5\,d$. Le pas p est déterminé par le calcul pour que la résistance à la rupture de la tôle par traction et celle des rivets par cisaillements soient égales. On utilise presque uniquement l'assemblage à couvre-joint double, leur épaisseur étant de 0,75 e.

1.5. Rivetages de tôles en alliages légers. — Les rivets sont du même alliage que celui des tôles à assembler et on adopte les proportions suivantes :

Rivets :

$2\,e \leqslant d \leqslant 3\,e$, pour des tôles de même épaisseur e ;

$e_1 \leqslant d \leqslant 3\,e_2$, pour des tôles d'épaisseurs différentes (e_1, épaisseur la plus grande et e_2, épaisseur de la tôle sur laquelle on forme la rivure) ;

$s = 1\,d$, pour une rivure fraisée ;

$s = 1{,}4\,d$, pour une rivure ronde ;

$s = 1{,}5\,d$, pour une rivure goutte de suif.

Rivetages :

$p = 3\,d$ (sauf rivetages d'étanchéité : $p = 2{,}5\,d$) ;

$a \geqslant 2\,d$, pour tôles d'épaisseur $e \leqslant 5$ mm ;

$a = 1{,}5\,d + 5$ mm, pour tôles d'épaisseur $e > 5$ mm.

1.6. Rivetages spéciaux. — Certains assemblages, accessibles d'un seul côté, ne permettent pas l'utilisation de la contre-bouterolle et on a mis au point des types de rivets permettant la formation de la rivure en agissant du côté de la tête. Par exemple, les rivets Chobert sont des rivets tubulaires dont la collerette de l'extrémité peut être gonflée par passage d'une broche (fig. I-12).

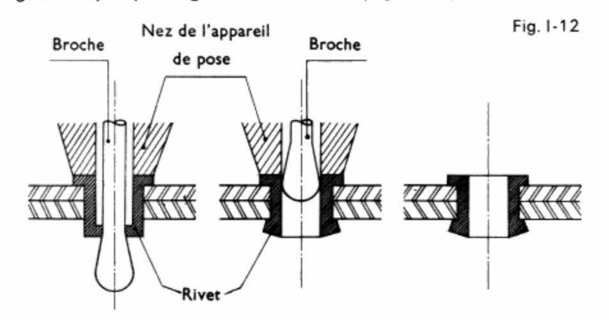


Fig. I-12

2. ASSEMBLAGES À LIAISON DÉMONTABLE

On distingue deux catégories principales d'assemblages démontables : d'une part, les assemblages par filetage et, d'autre part, les assemblages par clavetage.

2.1. Assemblages à liaison démontable par filetage

2.1.1. Génération de la vis et de l'écrou. — Si l'on enroule, sur un cylindre droit de diamètre d, une droite faisant avec les génératrices un angle α, on obtient une hélice (fig. I-13). La distance $AC = ac = a'c' = bd = p$ est appelée *pas de l'hélice*. L'angle α, inclinaison de l'hélice, et le pas sont liés par la relation suivante :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a'\,c'}{a\,a'} = \frac{p}{\pi\,d}$$

L'hélice (fig. I-14) est dite *à droite* quand l'enroulement est dirigé vers la droite, pour la partie vue, en s'éloignant de la base.

Si l'on déplace une surface plane (abC) le long de l'hélice, son plan passant toujours par l'axe du cylindre et son côté ab restant sur le cylindre, on engendre, en

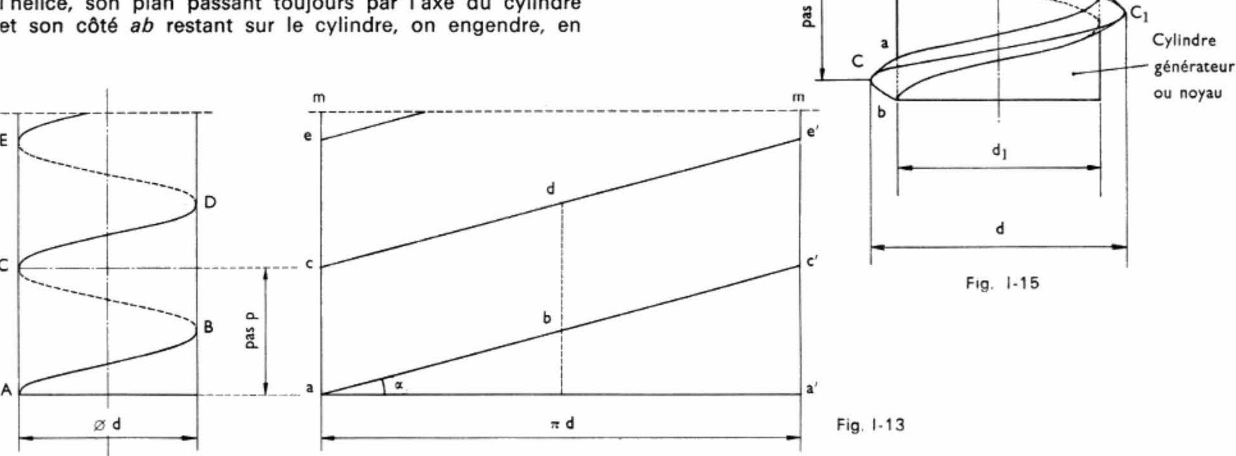


Fig. I-13

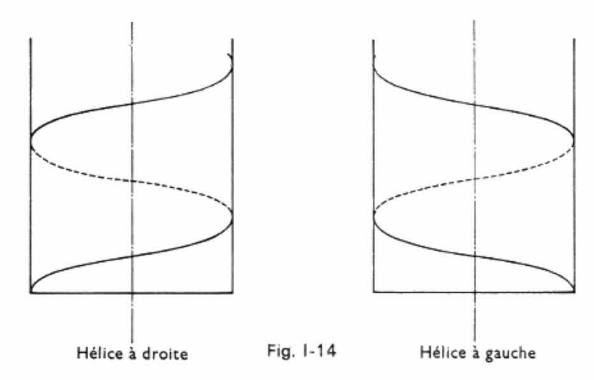


Fig. I-14

saillie sur le cylindre, un prisme hélicoïdal (fig. I-15) qui forme le *filet de la vis :* le cylindre avec le prisme enroulé en saillie est appelé *vis* et la surface (abC) *profil du filet*. La distance entre deux filets est le *pas de la vis*, égal d'ailleurs au pas de l'hélice génératrice. Le cylindre lui-même est appelé *noyau* de la vis. On considère deux diamètres : celui du cylindre de base de l'hélice $C\,C_1\,C_2$ qui est le diamètre extérieur de la vis ou *diamètre nominal d* et celui du cylindre générateur qui est le diamètre à fond de filet ou *diamètre du noyau* d_1.

L'emploi de la vis comporte toujours deux éléments de même pas : *la partie mâle*, vis proprement dite, constituée du noyau plein avec filet en saillie et *la partie femelle* ou écrou comportant en creux la forme que la vis offre en relief. La pièce mâle est dite *filetée*, la pièce femelle *taraudée* et, dans nombre de cas, un organe de machine constitue lui-même *l'écrou*. Celui-ci a une longueur qui est une fraction de celle de la vis et un très faible jeu lui permet de circuler librement sur la vis. Le mouvement relatif entre les deux pièces est toujours *de translation et de rotation simultanées :* si l'écrou est fixe, la vis avance en tournant et réciproquement ; si la vis ne peut avancer et qu'elle tourne, l'écrou, arrêté en rotation, avance sur la tige et réciproquement. À chaque tour, le déplacement axial est égal au pas.

Le système vis-écrou peut être employé comme organe de fixation ou comme organe de transformation de mouvement.

2.1.2. Types de filetage. — Suivant la forme du profil utilisé, on obtient :

— *le filet triangulaire*, d'exécution facile, employé pour toute la visserie et, en général, pour tous les éléments d'assemblages (son frottement, plus grand que celui du filet carré, diminue les risques de déblocage) ;

Fig. I-15

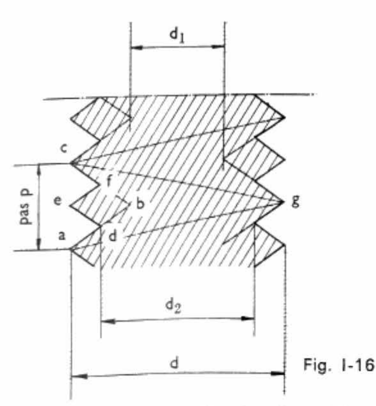


Fig. I-16

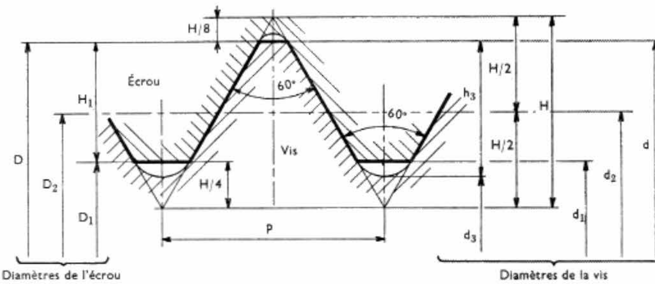


Fig. I-17
Profil ISO
p : pas
H : 0,866 p
D = d : diamètre nominal

$$D_2 = d_2 = d - \frac{3}{4}H = d - 0{,}6495\ p$$

$$D_1 = d_1 = d_2 - 2\left(\frac{H}{2} - \frac{H}{4}\right) = d - 1{,}0825\ p$$

$$d_3 = d_2 - 2\left(\frac{H}{2} - \frac{H}{6}\right) = d - 1{,}2268\ p$$

$$H_1 = \frac{D - D_1}{2} = 0{,}5412\ p \qquad h_3 = \frac{d - d_3}{2} = 0{,}6134\ p$$

— *le filet carré*, d'exécution délicate, utilisé dans les vis de transformation de mouvement pour son bon rendement ;

— *le filet trapézoïdal* facile à exécuter, de rendement comparable au précédent mais plus résistant ;

— *le filet rond*, difficile à exécuter mais très robuste, utilisé pour les assemblages soumis à des chocs.

Lorsque le filet dérive d'une seule hélice, la vis est dite à un *seul filet*. On peut également utiliser *n* hélices génératrices parallèles et de même pas : la vis est alors à *n* filets (fig. I-16). Cette disposition augmente la résistance. À pas égal, le diamètre d_2 du noyau de la vis à deux filets est beaucoup plus grand que celui d_1 de la vis à un filet.

2.1.3. Filetages normalisés. — Les plus courants ont comme profil un triangle *isocèle* ou *équilatéral*, à sommets tronqués ou arrondis suivant le système, dont la base (V. fig. I-17 à I-19) est égale au pas. Dans un but essentiel d'interchangeabilité, on a établi des règles définissant les profils et la correspondance entre pas et diamètres : au début du siècle existaient les systèmes SI, Whitworth, Sellers, Briggs, etc., dont dérivent les filetages normalisés actuels.

1° *Filetage métrique ou ISO.* — Indépendamment de l'Angleterre et des États-Unis d'Amérique, le Congrès international de Zurich a fixé, en 1898, les règles du système international (SI) (triangle équilatéral et pas métriques), base des normes européennes jusqu'à une date récente.

À la suite d'études internationales, il est désormais remplacé par le système ISO (troncature augmentée côté vis, séries de diamètres et pas légèrement modifiées) désigné par le symbole *M*. Ses caractéristiques sont précisées dans les deux normes françaises NF E 03-001 (profil ISO, fig. I-17) et NF E 03-013 (vue d'ensemble des filetages métriques à filet triangulaire), ainsi que dans

Tableau 1

Diamètre nominal			Filetage à pas gros		Filetages à pas fin										
					Pas										
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Pas	Section du noyau de la vis en millimètres carrés	4	3	2	1,5	1,25	1	0,75	0,5	0,35	0,25	0,2
					Section du noyau de la vis en millimètres carrés										
6			1	17,9							20,3				
		7	1	26,1							29,0				
8			1,25	32,9						36,0	39,4				
		9	1,25	43,8						47,4	51,3				
10			1,5	52,3					56,3	60,4	64,8				
		11	1,5	65,9						75,0	79,8				
12			1,75	76,2				81,1	86,0	91,1					
	14		2	105				116	122	128					
		15						136		149					
16			2	144				157		171					
		17						181		195					
	18		2,5	175			190	205		221					
20			2,5	225			242	259		277					
	22		2,5	281			300	319		339					
24			3	324			365	386		407					
		25					399	421		444					
	27		3	427			473	497		522					
		28					513	537		563					
30			3,5	519		544	596	623		650					
		32					686	714							
	33		3,5	647		675	733	763							
		35						864							
36			4	759		820	884	916							

Dimensions en millimètres.

le projet de norme PN E 03-100 (tolérances). Le tableau 1 (V. page précédente) donne un extrait de la norme NF E 03-013 pour les diamètres courants, ainsi que les pas et les sections de noyau.

2° *Filetage gaz.* — Le pas du gaz s'applique aux tubes en acier et aux raccords qui s'y adaptent, de la série dite « série gaz ». D'origine anglo-saxonne, il est normalisé et désigné par les mêmes symboles dans le monde entier. Son profil est celui de l'ancien filetage Whitworth mais ses pas sont plus fins. Sur les tubes, il s'exécute *cylindrique* ou *conique* (conicité de 6,25 %) : ce dernier assure l'étanchéité dans les filets. Les manchons sont toujours taraudés cylindriques (fig. I-18 a et b). Le tableau 2 ci-après donne un extrait des différents éléments de ce filetage correspondant aux tubes normalisés (norme française PN E 03-004).

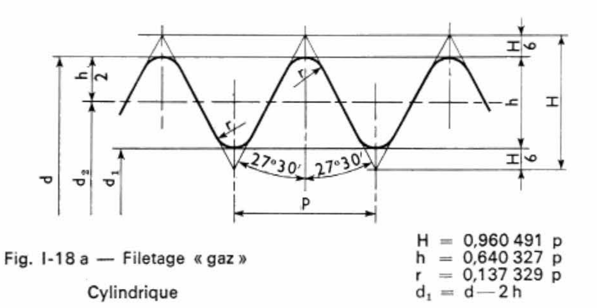


Fig. I-18 a — Filetage « gaz »

Cylindrique

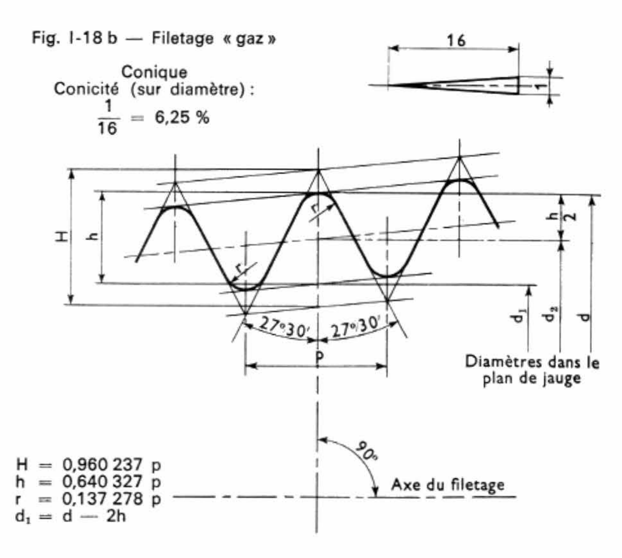
H = 0,960 491 p
h = 0,640 327 p
r = 0,137 329 p
d_1 = d — 2 h

3° *Filetage « Unified ».* — Dérivé des systèmes Whitworth et Sellers, le filetage « Unified », actuellement utilisé dans les pays où les mesures étaient exprimées en « pouces », emploie le profil ISO défini plus haut et comporte les séries UNC (gros), UNF (fins), UNEF (extra-fins) et UN (série à pas constants).

4° *Filetage N.P.T.* — Dérivé du système Briggs, il est utilisé aux États-Unis d'Amérique et mondialement pour les tubes d'installations pétrolières.

5° *Filetage trapézoïdal.* — Il s'emploie uniquement lorsque la vis transmet un effort important (vis de presse) et dans les mécanismes de transformation de mouvement (vis mère de tour). Le profil trapézoïdal donne aux filets une grande résistance, le rendement du système vis-écrou est nettement amélioré et le phénomène d'entaille du noyau par le filet triangulaire est supprimé.

Fig. I-18 b — Filetage « gaz »



H = 0,960 237 p
h = 0,640 327 p
r = 0,137 278 p
d_1 = d — 2h

— *Profil normalisé :* c'est un trapèze isocèle dont l'angle des côtés inclinés est de 30° (fig. I-19). La norme NF E 03-002 définit ses proportions et aucune correspondance n'est imposée entre diamètre et pas (celui-ci est métrique et défini par les conditions d'emploi) mais il est recommandé d'adopter $p \leqslant 0{,}25\ d$ pour ne pas affaiblir le noyau. Dans le même but, on utilise souvent des vis à 2 ou 3 filets.

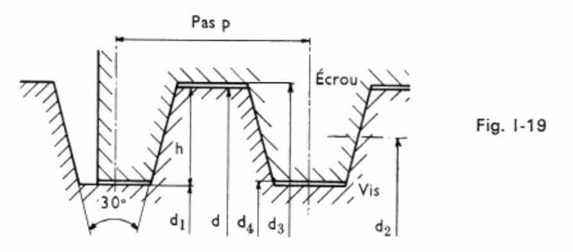


Fig. I-19

— *Profil A.C.M.E. :* d'origine américaine, il est très voisin du profil normalisé (les côtés inclinés du trapèze font un angle de 29°) et le pas est défini en nombre de filets par pouce.

Tableau 2

Dénomination	Ancienne dénomination	Pas p	Nombre de pas dans 25,4	Profondeur h	Diamètres extérieur $D = d$	Diamètres sur flancs $D_2 = d_2$	Diamètres du noyau $D_1 = d_1$
$^1/_8$	5 — 10	0,907	28	0,581	9,728	9,147	8,566
$^1/_4$	8 — 13	1,337	19	0,856	13,157	12,301	11,445
$^3/_8$	12 — 17	1,337	19	0,856	16,662	15,806	14,950
$^1/_2$	15 — 21	1,814	14	1,162	20,955	19,793	18,631
$^3/_4$	20 — 27	1,814	14	1,162	26,441	25,279	24,117
1	26 — 34	2,309	11	1,479	33,249	31,770	30,291
1 $^1/_4$	33 — 42	2,309	11	1,479	41,910	40,431	38,952
1 $^1/_2$	40 — 49	2,309	11	1,479	47,803	46,324	44,845
2	50 — 60	2,309	11	1,479	59,614	58,135	56,656
2 $^1/_2$	66 — 76	2,309	11	1,479	75,184	73,705	72,226
3	80 — 90	2,309	11	1,479	87,884	86,405	84,926
3 $^1/_2$	90 — 102	2,309	11	1,479	100,330	98,851	97,372
4	102 — 114	2,309	11	1,479	113,030	111,551	110,072
5	127 — 140	2,309	11	1,479	138,430	136,951	135,472
6	152 — 165	2,309	11	1,479	163,830	162,351	160,872

Dimensions en millimètres.

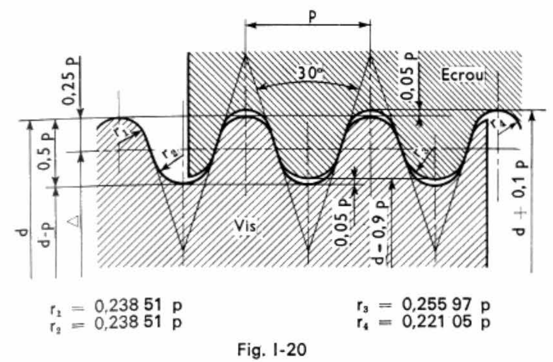


Fig. I-20

6° *Filetage à filets ronds.* — Le profil, pratiquement limité par des arcs de cercle (fig. I-20), est défini par la norme NF E 03-003, qui n'impose aucune correspondance entre diamètres et pas mais recommande un pas limité n'affaiblissant pas le noyau. D'exécution difficile et coûteuse, il est utilisé pour sa grande résistance dans des *cas spéciaux d'assemblages soumis à des chocs ;* l'absence d'arêtes vives, diminue les risques de corrosion et de grippage et rend ce filetage intéressant pour certaines pièces en alliages légers.

2.1.4. Organes filetés et taraudés. — De forme variable suivant l'utilisation, ils sont normalisés et on distingue : les boulons, goujons et écrous, les vis et les boulons de fondation. Exécutés en tous métaux (les plus fréquents étant les aciers et les laitons), fabriqués par matriçage, par tournage ou par décolletage, ils sont filetés, au tour, à la filière, par roulage, etc.

1° *Boulons.* — Élément type de l'assemblage rigide et démontable de deux ou plusieurs pièces (fig. I-21), il est constitué par :

— une tige filetée munie à une extrémité d'une forme, appelée tête, qui permet la manœuvre ou l'arrêt en rotation ; à l'autre extrémité, un chanfrein à 120° facilite l'entrée dans l'écrou et supprime le premier filet fragile ;

— un écrou, pièce taraudée dont la forme extérieure permet la manœuvre ou l'arrêt en rotation.

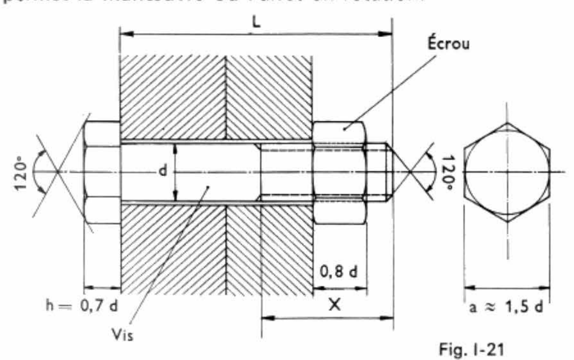


Fig. I-21

a) *Dimensions*

— Longueur totale L : elle est mesurée sous la tête (dans les boulons à tête fraisée, elle comprend la fraisure) ; pour un serrage d'épaisseur s, elle est définie par : $L \geqslant s + d$, et choisie dans la série : 2 — 2,5 — 3 — 4 — 5 — 6 — 8 — 10 — 12 — 14 — 16 — (18) — 20 — (22) — 25 — (28) — 30 — 35 — (de 5 en 5) — 90 — 100 — (de 10 en 10) — 200 — 225 (etc. de 25 en 25), les longueurs 18, 22 et 28 devant être évitées.

— Longueur filetée X : définie pour qu'à un serrage déterminé correspondent toujours deux boulons dont les longueurs totales soient consécutives dans la série normalisée, elle est donnée par : $X_n = d + (L_{n+1} - L_{n-1})$, L_{n+1} et L_{n-1} encadrant, dans la série normalisée ci-dessus, la longueur L_n du boulon considéré.

— Symboles normalisés : pour éviter sur les dessins la désignation détaillée des boulons, ceux-ci sont désignés par des symboles et des chiffres permettant une définition complète ; par exemple, boulon H 10 × 45, ce qui signifie : tête hexagonale, d = 10 mm, fileté ISO et L = 45 mm.

b) *Utilisation.* — La forme de la tête varie suivant l'utilisation ou la forme des pièces assemblées :

— *Serrage des pièces métalliques :* les boulons à tête hexagonale sont les plus courants car cette tête (V. fig. I-21) permet un serrage énergique à la clé. Lorsqu'on ne veut aucune saillie, on utilise la tête cylindrique noyée dans un lamage, ou la tête fraisée (fig. I-22a) pour des pièces de faible épaisseur. Si l'encombrement le permet, on préfère la tête fraisée bombée (fig. I-22b), de résistance légèrement supérieure. L'immobilisation en rotation est assurée par un ergot venu de forge ou emmanché dur dans la tige et logé dans une cavité du logement.

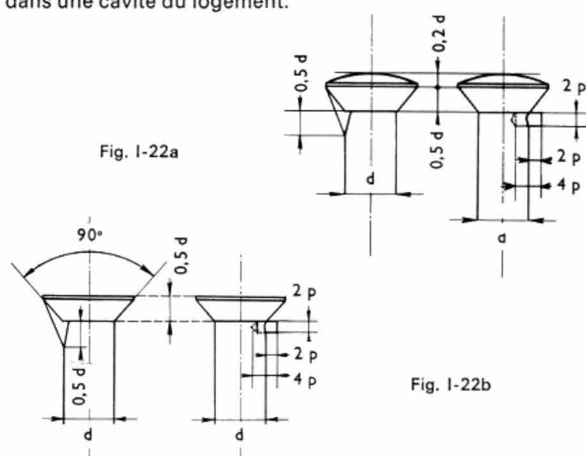


Fig. I-22a

Fig. I-22b

— *Serrage des pièces en bois :* pour réduire la pression unitaire sur la pièce, les têtes sont plus larges (têtes goutte de suif ; fig. I-23 ; carrées, fraisées ou Japy). L'immobilisation est obtenue par un ergot ou par un carré (placé immédiatement sous la tête ; fig. I-23) qui s'imprime à force dans le bois.

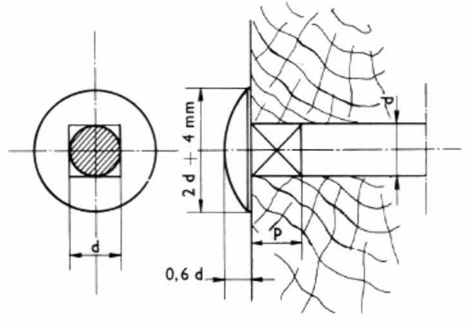


Fig. I-23

2° *Goujons.* — Quand il est impossible de percer un trou débouchant pour loger un boulon, on utilise un goujon, (fig. I-24) : c'est une tige filetée aux deux extrémités et

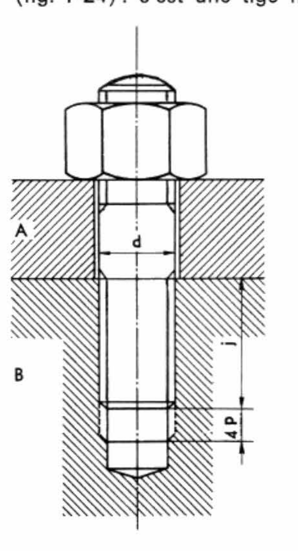


Fig. I-24

Métaux durs : j = 1,5 d
Métaux tendres : j = 2 à 3 d

bloquée sur les derniers filets, près de la partie lisse, dans une pièce taraudée *B*. La pièce *A*, de la même façon qu'avec un boulon, est serrée sur la pièce *B*. La longueur d'implantation *j* dépend de la nature du métal de *B*.

3° *Boulons de scellement et boulons d'ancrage*

— *Boulons de scellement :* destinés à fixer une machine sur un massif de béton, ils sont constitués par une tige, de longueur $L \approx 12\ d$, filetée à un bout. Leur corps, entaillé ou en forme de queue de carpe (fig. I-25), est scellé au ciment dans des trous borgnes du massif.

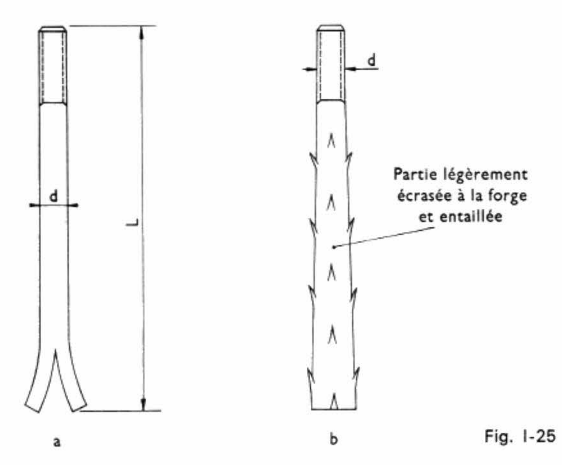


Fig. I-25

— *Boulons d'ancrage :* pour fixer une pièce (chaise de palier, plaque support, etc.) sur un mur ou une machine importante sur un massif, on utilise des boulons, à tête hexagonale ou goutte de suif, traversant le mur ou le massif et sous la tête desquels on dispose une contre-plaque en acier doux d'épaisseur 0,5 *d* à 1 *d* répartissant la pression et évitant le poinçonnage.

4° *Écrous.* — L'écrou, pièce métallique taraudée, permet l'immobilisation par pression des pièces qu'il serre contre la tête de la vis. Sa longueur, appelée *hauteur*, doit être telle que la pression sur les filets n'amène ni rupture, ni usure de ceux-ci : en général, elle est égale à 0,8 *d*. Il existe un grand nombre de types d'écrous, presque tous normalisés (fig. I-26) et dont la largeur sur plat *a* est la même que celle de la tête de la vis (V. fig. I-21).

— *Écrou hexagonal normal* (symbole *H*) : appelé aussi écrou à six pans, c'est le plus couramment utilisé.

— *Écrou hexagonal bas* (symbole *Hm*) : de hauteur réduite, il est généralement utilisé comme dispositif d'immobilisation d'un écrou (contre-écrou).

— *Écrou hexagonal haut* (symbole *Hh*) : très résistant, il est employé pour de fortes charges ou contre l'usure (démontages fréquents).

— *Écrou six pans à embase :* il comporte sur l'une des faces une embase cylindrique de grande surface et trouve son utilisation pour le serrage de pièces déformables.

— *Écrou à créneaux* (symbole *HK*) *:* il se présente comme un écrou *Hh* sur lequel on a pratiqué d'un côté des fraisures pour passer une goupille d'immobilisation et il s'emploie comme l'écrou normal. L'écrou haut à créneaux est employé comme l'écrou *Hh*.

— *Écrou borgne :* écrou hexagonal comportant une calotte sphérique ; il protège l'extrémité de la vis.

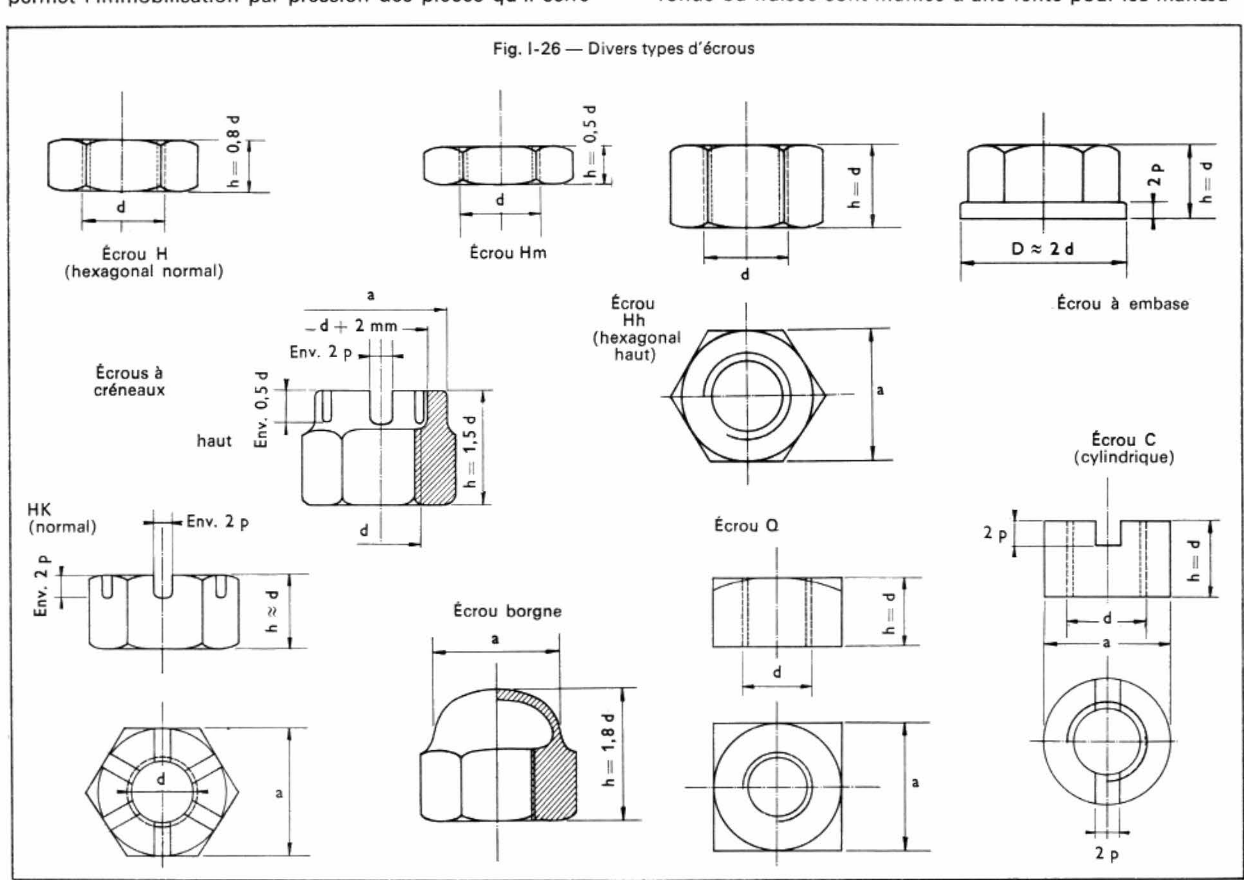
— *Écrous divers :* les écrous cylindriques et carrés et les écrous à oreilles manœuvrés à la main sont usuels.

5° *Vis à métaux.* — La vis est la pièce filetée qui, à l'inverse du boulon, n'a pas de dispositif d'immobilisation, (ergot, etc.) mais comporte toujours un moyen de manœuvre au montage. Elle peut agir par action de la tête (blocage de deux pièces) ou par action de son extrémité (vis de réglage, de butée ou de blocage). Les formes de têtes et d'extrémités sont définies par toute une série de normes.

a) *Formes des têtes.* — Les plus courantes sont (V. fig. I-27) : la tête hexagonale, la tête carrée et la tête cylindrique normales ou réduites, la tête ronde, la tête fraisée, plate ou bombée, et la vis sans tête.

Les vis à tête hexagonale ou carrée sont manœuvrées à l'aide de clés ; les vis sans tête et les vis à tête cylindrique ronde ou fraisée sont munies d'une fente pour les manœu-

Fig. I-26 — Divers types d'écrous



Tête QP — Tête QM
Vis à tête carrée normale — petite

Tête F/90 — Vis à tête fraisée
Tête FB/90 — Vis à tête fraisée bombée

Tête C ≈ 1,6 d — Tête CM ≈ 1,4 d
Vis à tête cylindrique normale — réduite

Tête R ≈ 1,8 d — Vis à tête ronde

Vis Chc — Vis à tête à 6 pans creux

Vis sans tête

Fig. I-27
Différentes formes des têtes de vis (avec le symbole utilisé pour les désigner)

vrer à l'aide d'un tournevis ou d'un six pans creux pour les manœuvrer à l'aide d'une clef hexagonale mâle.

En général, les vis d'assemblage sont à tête hexagonale, cylindrique, ronde ou fraisée et les vis de blocage et de réglage sont à tête carrée réduite, ou sans tête.

b) *Formes des extrémités.* — Lorsqu'une vis travaille en bout, pour ne pas détériorer le premier filet, il faut employer une extrémité de forme appropriée à sa destination (fig. I-28).

— *Les vis à téton* assurent un blocage énergique et très souvent le téton est cémenté-trempé pour éviter le matage. Elles sont utilisées pour le blocage des outils et le serrage des lardons, comme butée et, éventuellement, comme guidage (arrêt en rotation laissant la translation libre).

— *Les vis à cuvette* ont une extrémité coupante et sont utilisées pour l'immobilisation de pièces.

— *Les vis à bout pointu*, terminées par un cône à 90°, qui s'engage dans une fraisure de la pièce, permettent l'immobilisation et le positionnement simultanés.

2.1.5. Rondelles. — Pour avoir une meilleure portée, limiter la pression ou éviter les détériorations (démontages fréquents), on interpose entre l'écrou (ou la tête de vis) et la pièce serrée un anneau métallique, appelé *rondelle*. Brutes de découpage ou décolletées, ce sont les rondelles :

— *étroites* (symbole *Z*), réservées aux vis à tête réduite ;

— *moyennes* (symbole *M*, fig. I-29), les plus courantes ;

— *larges* (symbole *L*), employées dans l'appareillage électrique et la charpente en bois ;

— *très larges* (symbole *LL*), utilisées en sellerie.

Leurs proportions sont données par la norme NF E 27 - 611.

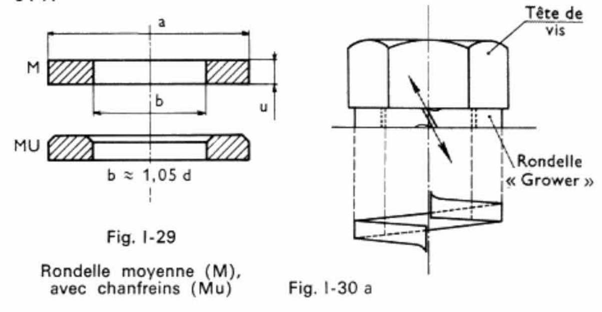
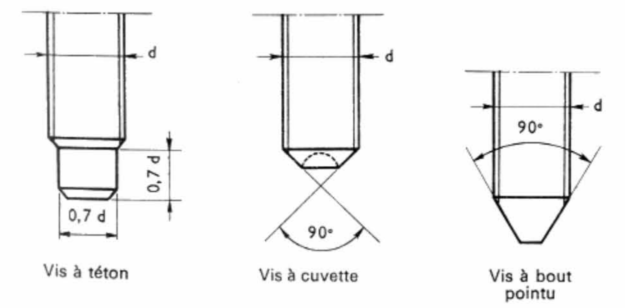


Fig. I-29
Rondelle moyenne (M), avec chanfreins (Mu)

Fig. I-30 a



Vis à téton — Vis à cuvette — Vis à bout pointu

Fig. I-28 — Différentes formes des extrémités de vis

2.1.6. Freinage des vis, boulons et écrous. — Bien que le frottement suffise pour maintenir le blocage, les vibrations peuvent entraîner le desserrage et il est souvent nécessaire d'arrêter l'écrou en rotation.

a) *Contre-écrou.* — Après avoir serré l'écrou, un second écrou (en général *Hm*) est bloqué énergiquement sur le premier : la réaction mutuelle des deux écrous subsiste, même si la réaction de la pièce sur le premier écrou disparaît, et assure l'arrêt en rotation de l'écrou principal.

b) *Rondelles spéciales.* — On utilise aussi des rondelles élastiques spéciales.

— *Rondelles Grower.* — Ce sont des anneaux en fil d'acier carré ou rectangulaire, qui forment ressorts : leurs extrémités coupantes s'impriment dans les faces de la pièce et de l'écrou et s'opposent au desserrage (sens d'enroulement inverse du sens du filetage ; fig. I-30a).

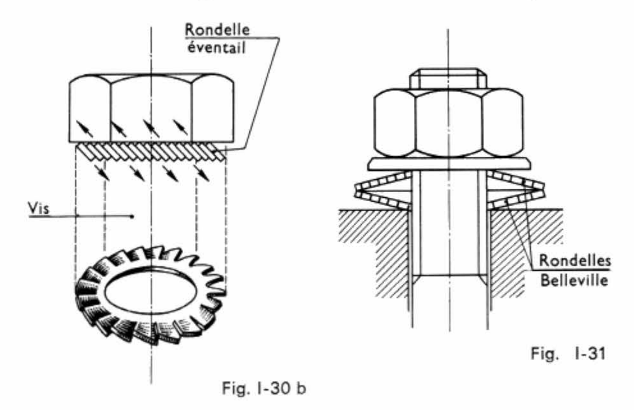


Fig. I-30 b

Fig. I-31

— *Rondelles à dents.* — Dites aussi rondelles éventail, elles ont sur la partie extérieure (fig. I-30b) des lamelles inclinées, dont les arêtes pénètrent dans les surfaces d'appui et interdisent le desserrage.

— *Rondelles Belleville.* — Si la vis et les pièces à serrer sont en matériaux différents, leur différence de dilatation, qui pourrait annuler le serrage, est compensée par la détente de rondelles élastiques coniques (dites Belleville et employées par paire ; fig. I-31).

c) *Goupilles.* — Tiges d'acier mises en place dans un trou de la vis, après blocage de l'écrou, elles sont emmanchées dur (goupille conique I) ou enfilées (goupilles fendues V dont les branches seront rabattues ; fig. I-32) et interdisent la rotation de l'écrou. Aucun réglage du serrage n'est possible avec les écrous ordinaires, alors qu'avec les écrous à créneaux, ce réglage se fait par 1/6 de tour.

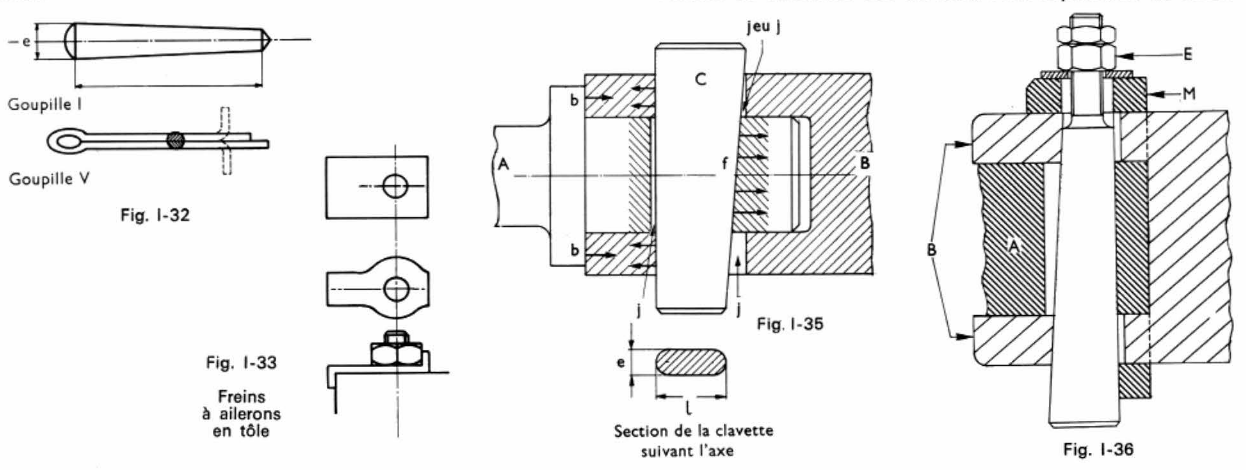


Fig. I-32

Fig. I-33
Freins
à ailerons
en tôle

Fig. I-35

Section de la clavette
suivant l'axe

Fig. I-36

d) *Freins d'écrou.* — Pour des raisons d'encombrement ou de sécurité, on emploie des freins d'écrou, rondelles de formes spéciales, interdisant la rotation de l'écrou (ou de la tête de vis). Ce sont :

— *Les freins à ailerons*, rondelles solidaires de la pièce et de l'écrou par rabattement des bords (fig. I-33).

— *Les freins de forme*, emboîtés sur l'écrou et fixés à la pièce par vis, dont l'empreinte à douze crans permet le réglage du serrage par 1/12 de tour.

— *Les rondelles-freins*, qu'un ergot immobilise sur la vis, dont une languette est rabattue dans une encoche spéciale de l'écrou et qui sont réservées au montage des roulements à billes.

2.1.7. Manœuvre des organes filetés. — Le serrage et le desserrage des vis et des écrous se fait à l'aide d'outils, appelés *clés :* composées d'un dispositif de maintien de la tête (ou de l'écrou) et d'un levier de manœuvre, elles sont réalisées en acier demi-dur ou en acier spécial au vanadium. La longueur du levier, proportionnelle au couple de serrage, varie sensiblement comme le cube du diamètre nominal.

a) *Clés à ouverture fixe.* — Désignées par la largeur sur plat *a* de l'écrou à serrer, on trouve les *clés plates* (normes NF E 74-301 et E 74-302 ; fig. I-34), les *clés à œil* et les *clés à pipe* qui sont simples ou doubles. Les *clés à tube* et les *clés à douille* permettent d'atteindre des écrous d'accès difficile.

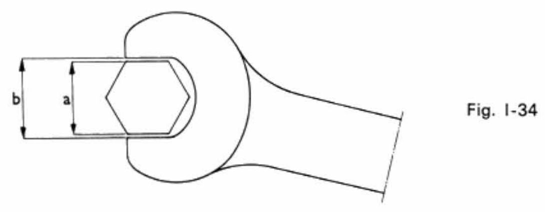


Fig. I-34

b) *Clés à ouverture réglable.* — Dans ces clés le dispositif de maintien comprend deux mâchoires d'écartement réglable par vis et crémaillère (*clé à molette*) ou par vis et écrou (*clé anglaise*). Intéressantes parce qu'une même clé est utilisable pour une gamme extrêmement étendue d'écrous, elles présentent cependant un inconvénient : elles risquent de détériorer les arêtes des écrous du fait du manque de rigidité des mâchoires.

c) *Clés pour six pans creux.* — Ces clés sont constituées par un barreau coudé de section hexagonale.

2.2. Assemblages à liaison démontable par clavetage. — Pour rendre solidaire en translation ou en rotation une tige et un moyeu, ou deux tiges, on utilise un élément d'assemblage, appelé *clavette :* c'est une pièce en acier dont la forme dépend de l'assemblage à réaliser. Si la liaison est en translation, le clavetage est dit *transversal ;* si la liaison est en rotation, il est dit *longitudinal.*

2.2.1. Clavetage transversal. — Il est utilisé pour la fixation de colonnes sur un bâti, l'accouplement de deux tiges, etc. La clavette agit comme un *coin*, suivant l'axe des pièces à assembler, en passant dans des mortaises, prévues avec un jeu *j* (fig. I-35). Si la pièce *A* est épaulée, le serrage est réalisé en *b* ; sinon il est obtenu à *fond d'emmanchement.*

On vérifie la pièce la plus faible à la traction (compte tenu de la mortaise) et la clavette à la flexion (poutre sur deux appuis avec charge concentrée au centre). Si *d* est le diamètre de la pièce la plus faible on adopte en général : $l \approx 1{,}25\ d$ et $e \approx 0{,}25\ d$. La clavette est en acier mi-dur, sa pente varie de 2 à 7 % suivant que l'assemblage est permanent ou démontable et elle dépasse légèrement de part et d'autre de l'assemblage.

Pour augmenter la sécurité (efforts alternés, vibrations), on freine la clavette par une goupille, par un boulon ou par un dispositif spécial (fig. I-36) ; dans ce cas, la clavette comporte une tige filetée et un écrou *E* la maintient en place.

2.2.2. Clavetage longitudinal. — Il est utilisé pour entraîner en rotation un volant, une poulie, un engrenage, etc. La clavette, prisme en acier mi-dur placé dans le sens de l'axe de l'arbre, est engagée en partie dans une rainure du moyeu et en partie dans une rainure de l'arbre.

1° *Clavetage forcé*. — La clavette est montée serrée entre la pièce et l'arbre (pente de 1 % de la face supérieure) et avec un léger jeu dans la rainure de la pièce à bloquer. Ce montage est peu précis car la poussée de la clavette exclut un centrage parfait de la pièce sur l'arbre. Plusieurs types de clavettes sont employés :

— Clavette inclinée sans talon : la clavette, à extrémités arrondies, fixe dans la rainure de l'arbre, est montée avec un léger serrage ; ensuite, le moyeu est monté à force (fig. I-37).

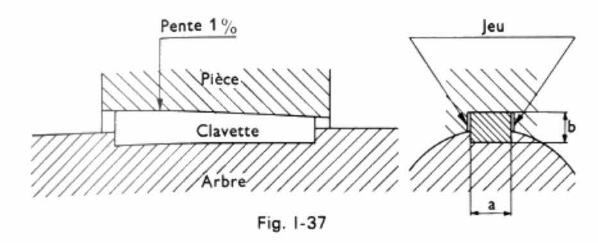


Fig. I-37

— Clavette inclinée à talon : le talon sert à monter (ou à extraire) la clavette, le moyeu étant en place ; ce montage est utilisé pour des volants importants (fig. I-38).

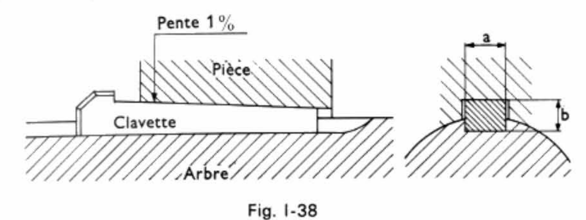


Fig. I-38

— Clavette mince à talon : la rainure de l'arbre est remplacée par un plat pour ne pas affaiblir sa section (petit diamètre ; fig. I-39).

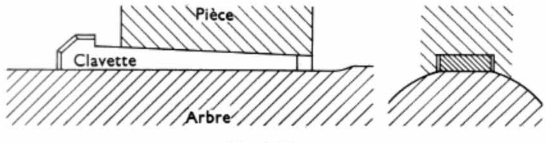


Fig. I-39

2° *Clavetage libre*. — La clavette, *ajustée sans jeu* côté arbre, est *libre* côté moyeu et ne s'oppose pas au centrage parfait du moyeu sur l'arbre (fig. I-40). Ce dispositif, utilisé pour les montages précis, ne positionne pas en translation et doit être complété. On emploie plusieurs types de clavettes :

— Clavette parallèle ordinaire : elle peut être à bouts droits ou à bouts ronds (V. fig. I-40).

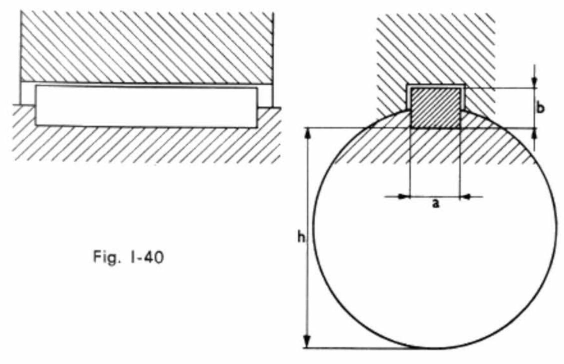


Fig. I-40

— Clavette parallèle fixée par vis : pour les grandes dimensions ou si le moyeu se déplace axialement, on fixe la clavette par deux vis à tête cylindrique (fig. I-41) et un trou taraudé permet l'extraction.

— Clavette disque : dite aussi *clavette Woodruff ;* elle est d'exécution et de montage faciles (fig. I-42) mais elle affaiblit l'arbre.

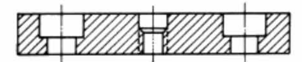


Fig. I-41

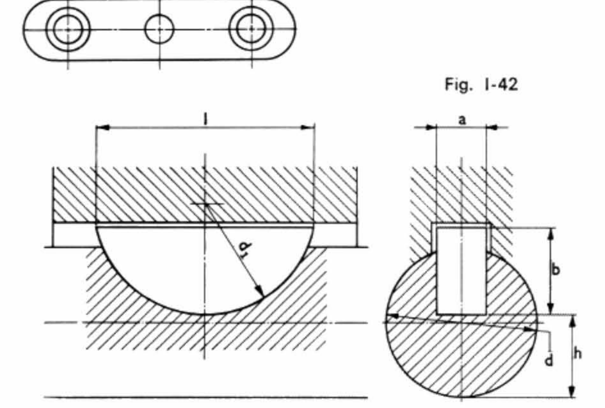


Fig. I-42

3° *Dimensions et calcul des clavettes. — La largeur a et la hauteur b* sont fonction du diamètre *d* de l'arbre ; les valeurs, normalisées (normes NF E 27-656, 7 et 8), ont été choisies pour équilibrer les risques de rupture entre l'arbre, la clavette et le moyeu.

Le tableau ci-après donne ces valeurs pour les diamètres d'arbres courants.

Diamètre *d* de l'arbre (en millimètres)	Dimensions de la clavette (en millimètres carrés)		*h* (V. fig. I-43)
	a	b	
6	2	2	$d - 1{,}5$
8	2	2	
10	3	3	$d - 2$
14	5	5	$d - 3$
16	5	5	
18	6	6	$d - 3{,}5$
20	6	6	
22	6	6	
24	8	7	$d - 4$
30	8	7	
35	10	8	$d - 5$
40	12	8	
50	14	9	$d - 5{,}5$
55	16	10	$d - 6$
60	18	11	$d - 7$
70	20	12	$d - 7{,}5$
80	22	14	$d - 9$

Les dimensions des clavettes disques sont également normalisées (NF E 27-653).

La longueur L (en millimètres) est telle que :

$$L \geqslant \frac{F}{p \cdot s}$$

si l'on exprime la pression de contact *p* sur la face d'entraînement, en décanewtons par millimètres carrés (de 10 à 15 daN/mm² pour l'acier dans des conditions moyennes) *F*, l'effort tangentiel dû au couple d'entraînement en

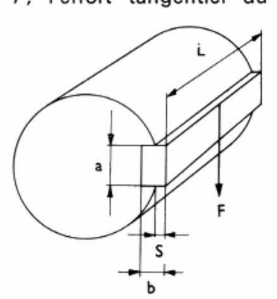


Fig. I-43

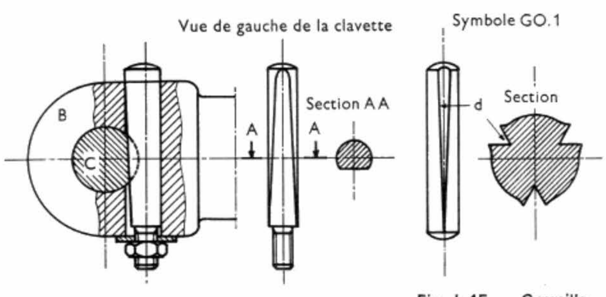


Fig. I-44 — Clavette tangente

Fig. I-45 — Goupille cannelée L.G.C.

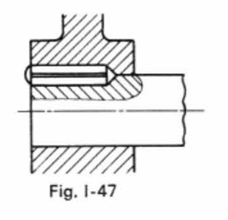


Fig. I-47

Fig. I-48

e ⩽ 0,25 d
D ⩾ 25 T pour acier
D ⩾ 3,5 T pour fonte

Fig. I-48 a

Fixation d'un levier sur un tube

Assemblages par goupilles L.G.C.

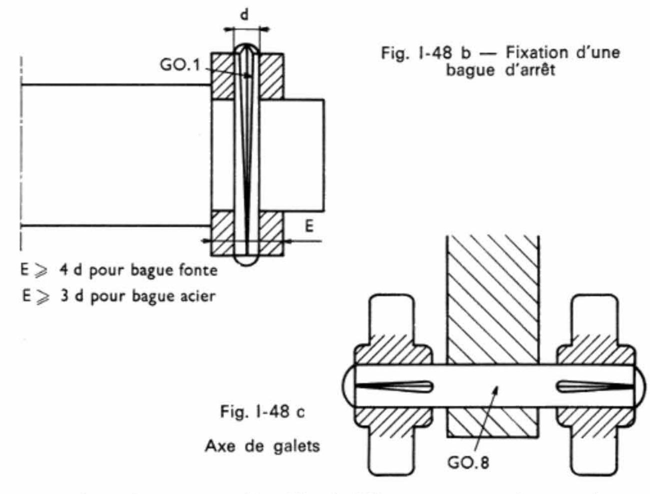


Fig. I-48 b — Fixation d'une bague d'arrêt

Fig. I-48 c

Axe de galets

décanewtons et s le dépassement de la clavette en millimètres (fig. I-43). De plus, on vérifie la clavette au cisaillement : $L \geqslant \frac{F}{a \cdot R_{pg}}$, R_{pg} étant la résistance pratique au cisaillement (décanewtons par millimètre carré).

2.3. Assemblages à liaison démontable spéciaux

2.3.1. Assemblage par clavette tangente (fig. I-44). Cette liaison est obtenue par une clavette cylindrique dont le méplat incliné est en contact avec un plat de l'arbre C et dont le logement dans B est un trou cylindrique de même diamètre qu'elle. Une tige filetée, prévue au bout de la clavette, et un écrou permettent le serrage ; (exemple d'emploi : assemblage de manivelles sur un axe de pédalier de bicyclette).

2.3.2. Assemblage par goupille cannelée. (Fabricant L.G.C.). — Cette goupille cylindrique comporte trois cannelures longitudinales d obtenues par refoulement du métal (fig. I-45) ; montée à force dans un trou cylindrique de diamètre égal à son diamètre nominal, elle y est maintenue par la pression due à la déformation élastique des cannelures et reste démontable sans détérioration. Il en existe de nombreuses variétés (fig. I-46 à 48). Placée entre cuir et chair (à la manière d'une clavette longitudinale), elle peut transmettre un couple faible (fig. I-47).

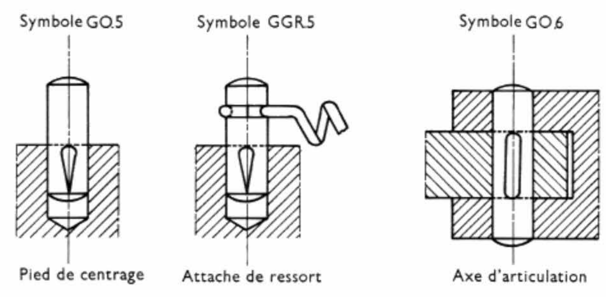
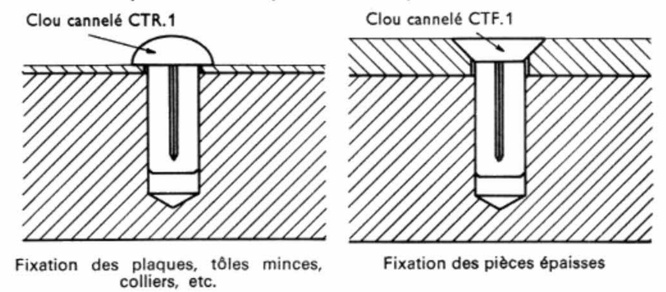


Fig. I-46 — Divers types de goupilles L.G.C.

Les clous cannelés (fig. I-49) permettent de remplacer les vis pour fixer une pièce sur une pièce massive.



Fixation des plaques, tôles minces, colliers, etc.

Fixation des pièces épaisses

Fig. I-49 — Assemblages par clous cannelés L.G.C.

CHAPITRE II

ASSEMBLAGES À LIAISON ÉLASTIQUE

Par l'interposition d'un organe flexible ces assemblages autorisent des déplacements relatifs de faible amplitude, des pièces les constituant. L'organe flexible peut être métallique ou non. Sa déformation absorbant une certaine quantité d'énergie mécanique, les liaisons élastiques sont utilisées pour amortir les chocs.

1. RESSORTS

La déformation des métaux par compression ou par extension étant faible, les ressorts travaillent à la flexion ou à la torsion. De plus, le métal utilisé et la forme du ressort autorisent des déformations importantes.

1.1. Ressorts de torsion

1.1.1. Ressorts hélicoïdaux (fig. II-1). — Ces ressorts

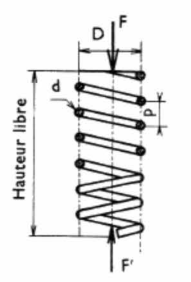


Fig. II-1

Ressort hélicoïdal de compression

sont constitués par un fil enroulé en hélice. Lorsque le ressort supporte un effort axial qui provoque son raccourcissement, on l'appelle *ressort de compression :* à l'origine les spires ne sont pas jointives. L'aplatissement ou flèche

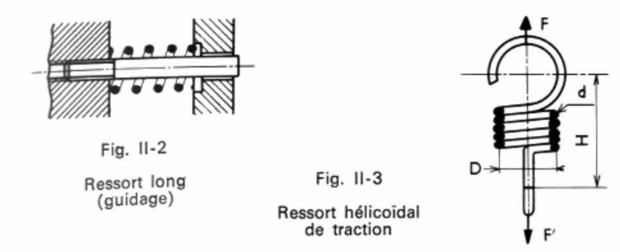


Fig. II-2

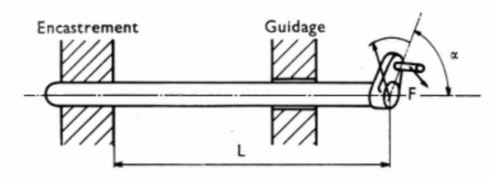
Ressort long (guidage)

Fig. II-3

Ressort hélicoïdal de traction

est proportionnel à la valeur de l'effort. Les *ressorts de compression* de grande longueur doivent être guidés par une tige centrale (fig. II-2). Lorsque le ressort supporte un effort axial qui provoque son allongement, on l'appelle *ressort de traction :* à l'origine les spires sont jointives. À chaque extrémité, une boucle sert d'attache (fig. II-3). (V. t. 3 ; Résistance des matériaux ; chap. 9).

1.1.2. Barre de torsion (fig. II-4). — C'est un ressort constitué par une barre métallique, de section circulaire, dont une extrémité est fixée dans un support ; l'autre extrémité subit l'action du couple de torsion et sa déformation angulaire est proportionnelle au moment du couple et à la longueur de la barre (V. t. 3, Résistance des matériaux ; chap. 6 § 2.2). Les barres de torsion sont souvent utilisées dans les suspensions de voiture de tourisme.



1.2. Ressorts de flexion

1.2.1. Ressorts à lame simple (V. t. 3 ; Résistance des matériaux ; fig. IX-5). — Une lame métallique, encastrée à une extrémité, qui subit l'action d'une charge *P* constitue un ressort de flexion. Ces ressorts ont une grande flexibilité mais la charge supportée est faible.

1.2.2. Ressorts à lames multiples (fig. II-5). — Afin de répartir les contraintes, ils sont constitués par une lame maîtresse et des lames auxiliaires de longueurs décroissantes maintenues et guidées par des étriers. Ces ressorts subissent un allongement lors de la flexion, d'où la nécessité d'articulations aux deux extrémités et d'une jumelle. Ils sont surtout utilisés dans les suspensions de véhicules lourds.

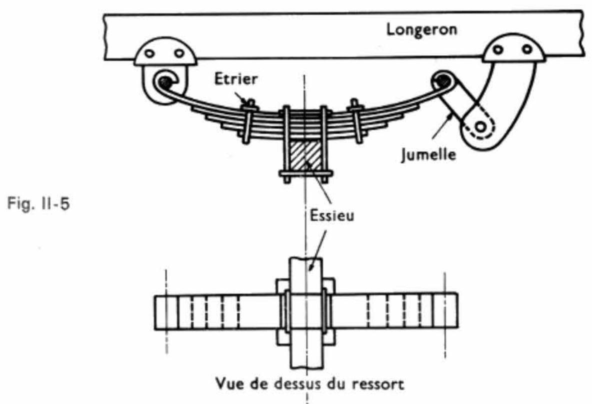


Fig. II-5

1.3. Matériaux utilisés. — Ce sont des métaux à limite élastique élevée tels que les aciers durs au carbone (en fil étiré et trempé, appelé corde à piano), les aciers mangano-siliceux, l'acier inoxydable 18-8, le bronze phosphoreux et le bronze au béryllium.

2. LIAISON ÉLASTIQUE NON MÉTALLIQUE

Les matériaux utilisés sont le caoutchouc naturel ou synthétique, les élastomères de synthèse (chlorure de polyvinyle, silicones), le cuir, le feutre et, éventuellement, des fluides comme l'huile ou des gaz. Les applications principales sont : l'amortissement des chocs, l'absorption des vibrations, la réalisation d'articulations élastiques et de liaisons élastiques entre deux arbres (V. Accouplements élastiques ; chap. 5, § 2.1.2).

2.1. Généralités sur les supports élastiques. — Ces organes possèdent des propriétés d'élasticité et d'amortissement : *l'élasticité* est la faculté d'un corps de se déformer avec une amplitude proportionnelle à la charge et de manière réversible ; *la rigidité k* dans une direction (inverse de la souplesse) est le coefficient de proportionnalité de la *charge au déplacement* dans cette direction ; *l'amortissement* est l'effet de freinage d'un mouvement vibratoire dont l'amplitude est progressivement réduite.

La suspension élastique d'une machine s'obtient en intercalant des supports élastiques entre elle et ses assises. Les vibrations conditionnent les caractéristiques de cette suspension et on distingue les vibrations forcées (ou entretenues), dues au fonctionnement interne de la machine ou aux machines voisines, et les vibrations propres qui sont celles que prend la machine après avoir été écartée de sa position d'équilibre et abandonnée à elle-même.

2.2. Mode d'action d'une suspension élastique. — Si une machine repose sur ses assises par des contacts rigides en plus de trois points (montage hyperstatique), il est impossible de prévoir les efforts qui agissent en chacun de ces points : une suspension élastique a d'abord un *rôle statique* de répartition des charges, grâce à son élasticité. De plus, elle admet sans inconvénients les différences d'entraxe, les défauts de forme des surfaces d'appui et les déplacements dus à la dilatation.

Mais son rôle le plus important est un *rôle dynamique :* en cas de choc, la force maximale atteinte est d'autant plus faible que sa course élastique est plus grande (donc qu'elle est moins rigide) et que l'amortissement réduit rapidement ses vibrations propres.

2.3. Principaux types de supports élastiques

2.3.1. Butée élastique. — Avec une butée rigide, comme celle utilisée en mécanique pour limiter un mouvement, les efforts sont très intenses au moment du choc, d'où bruit, matage et détériorations.

— *La butée souple*, avec choc direct sur le matériau élastique, supprime ces inconvénients. L'élastomère adhère sur une armature métallique avec vis de fixation : le montage est facile.

— *La butée simple* (fig. II-6), en forme de diabolo, a une surface de contact plane et un effet immédiat (exemple : suspension d'un groupe convertisseur).

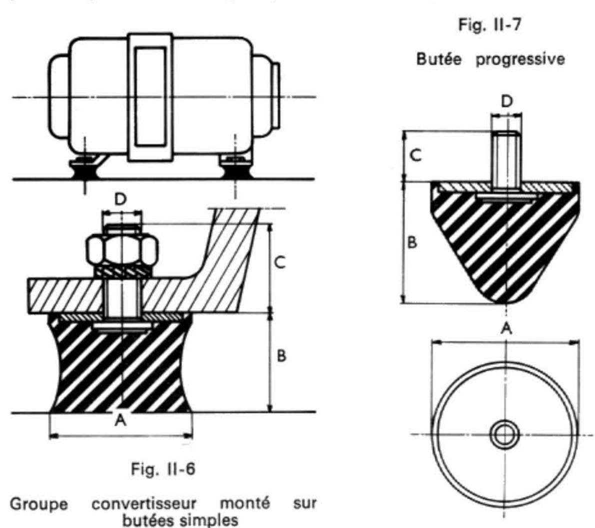


Fig. II-6

Groupe convertisseur monté sur butées simples

Fig. II-7

Butée progressive

— *La butée progressive* (fig. II-7), de forme conique, a une surface de contact progressive et un effet beaucoup plus doux.

Fig. II-8

Suspension et accouplement élastique d'un groupe motopompe avec des Radiaflex R (*Paulstra*)

Accouplement

Suspension

2.3.2. Radiaflex *R*. — Ce plot élastique est une butée simple mais avec deux armatures métalliques parallèles. Il se prête aux usages les plus variés (suspension élastique ou isolement antivibratoire de moteurs, de groupes convertisseurs, d'appareils de mesure, etc.). Son élasticité est maximale dans toutes les directions parallèles aux armatures : celles-ci doivent donc être parallèles à la direction des vibrations (fig. II-8).

2.3.3. Support élastique *SC*. — Ce support, spécialement conçu pour l'isolement vibratoire aux moyennes et hautes fréquences, est constitué par un anneau de caoutchouc adhérant à deux armatures concentriques. L'armature extérieure supporte une calotte conique de caoutchouc qui limite la course en cas de surcharge et donne une rigidité axiale croissante avec la charge, condition optimale pour avoir une suspension apériodique. La rigidité radiale est très grande (fig. II-9).

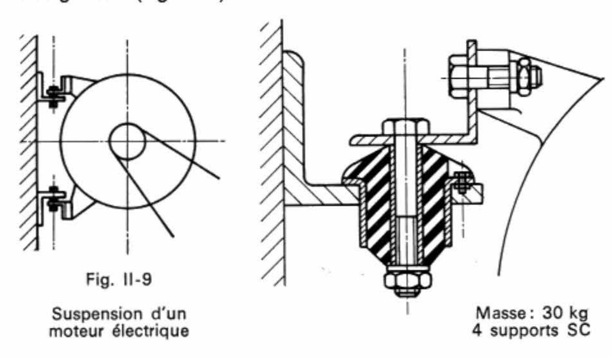


Fig. II-9

Suspension d'un moteur électrique

Masse : 30 kg
4 supports SC

2.3.4. Support élastique *SCP*. — Ce support a les mêmes propriétés que le support *SC*. De plus, le caoutchouc est très bien protégé et la partie supérieure est munie d'un bossage taraudé (fig. II-10 : suspension d'un groupe électrogène).

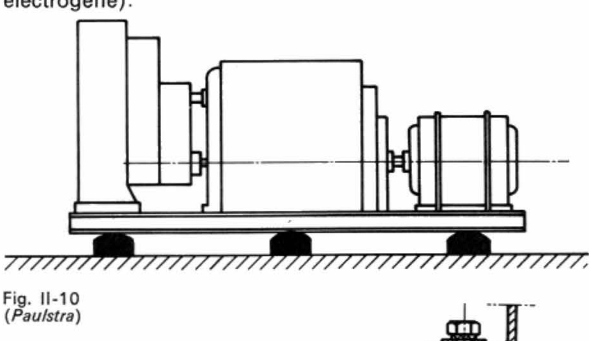


Fig. II-10
(*Paulstra*)

Coupe
d'un support SCP

2.3.5. Support Beca. — Ce support comporte deux armatures planes, circulaires et parallèles, reliées par une couronne de caoutchouc en forme de coupole qui permet, en cas de surcharge, un effet de butée progressive par l'emploi d'une coupelle *P* (protection et talonnement). L'élasticité est grande dans toutes les directions ; ce support s'emploie pour les machines présentant des composantes de vibrations horizontales importantes (fig. II-11).

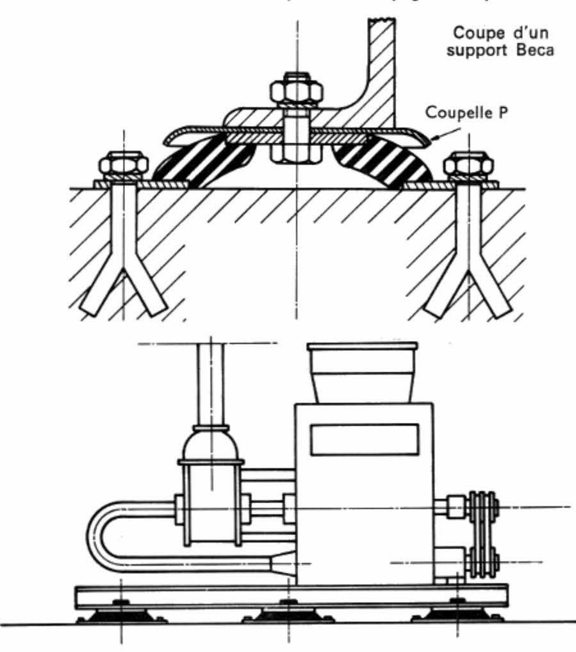


Fig. II-11 — Suspension élastique d'un broyeur à marteaux à l'aide de supports Beca (*Paulstra*)

2.3.6. Support Isodyne. — Ce support est destiné à soustraire les appareils délicats aux effets des vibrations. Il présente une grande souplesse radiale et une certaine raideur axiale : il est essentiel que le sens des vibrations les plus importantes soit perpendiculaires à l'axe. Il comporte des demi-moyeux plats reliés par des membranes coniques en caoutchouc (fig. II-12).

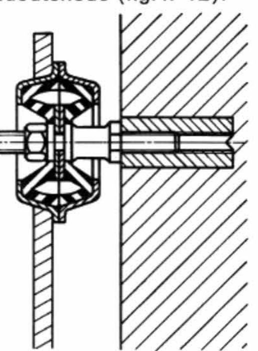


Fig. II-12

Coupe d'un support Isodyne de fixation d'une plaque support d'appareil de mesure

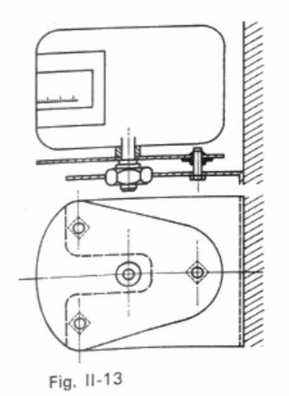
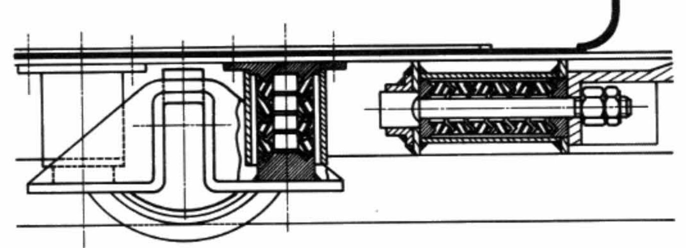


Fig. II-13

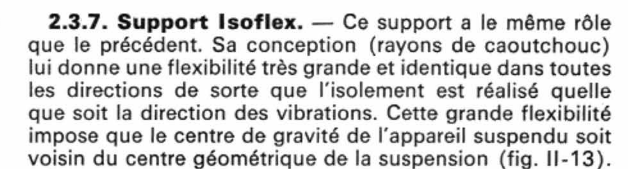
Suspension d'un galvanomètre par support Isoflex (*Paulstra*)

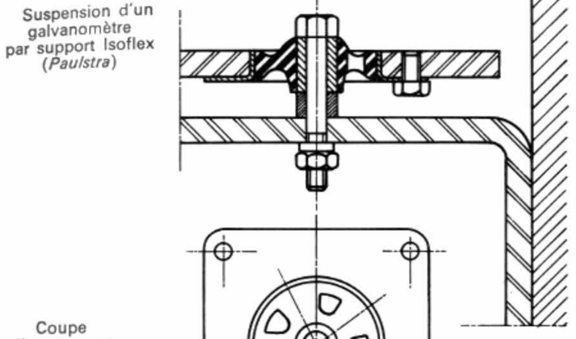


Coupe d'un élément Batra

Fig. II-14

Crochet et suspension de berline avec élément Batra (*Paulstra*)





Coupe d'un support Isoflex

2.3.7. Support Isoflex. — Ce support a le même rôle que le précédent. Sa conception (rayons de caoutchouc) lui donne une flexibilité très grande et identique dans toutes les directions de sorte que l'isolement est réalisé quelle que soit la direction des vibrations. Cette grande flexibilité impose que le centre de gravité de l'appareil suspendu soit voisin du centre géométrique de la suspension (fig. II-13).

2.3.8. Élément Batra. — C'est une couronne de caoutchouc. On peut lui ajouter une ou deux armatures (tôle emboutie adhérant ou non au caoutchouc). Ses faces comportent, l'une une gorge circulaire, l'autre une saillie complémentaire qui centre chaque élément d'un empilage par rapport au précédent. Sa capacité de charge est proportionnelle à sa surface. L'élasticité d'un empilage croît avec le nombre d'éléments empilés. Son emploi est indiqué pour l'absorption de chocs violents (fig. II-14).

2.4. Choix d'un type de support. — Il est déterminé, *en fonction des charges imposées*, par les flèches admissibles, les conditions d'encombrement et les facilités de montage (caractéristiques indiquées par le constructeur). De plus, il faut que les charges statiques agissent sur le caoutchouc en compression et les charges dynamiques en cisaillement (élasticité maximale dans la direction des vibrations).

CHAPITRE III

GRAISSAGE DES MACHINES



1. GÉNÉRALITÉS

Les inconvénients dus aux frottements sont nombreux :
— perte d'énergie, absorbée par les frottements ;
— usure des pièces, néfaste à la précision des guidages ;
— échauffement des pièces, qui peut entraîner leur grippage.

L'expérience montre que l'interposition d'une couche fluide entre des surfaces frottantes diminue la résistance au glissement, le frottement à sec étant remplacé par le frottement des couches fluides entre elles ; ce dernier est dit *médiat* par opposition au frottement *immédiat* ou frottement à sec. Si l'épaisseur de la couche fluide est suffisante pour que les aspérités des deux pièces ne puissent venir en contact, le frottement est *fluide* ou *hydrodynamique*. Au-dessous de cette épaisseur minimale, le frottement est *demi-fluide* ou *mixte* et la résistance au glissement augmente quand l'épaisseur de la couche diminue. Enfin, quand elle est très inférieure à la hauteur des aspérités, le frottement est dit *onctueux* et le coefficient de frottement se rapproche de celui du frottement à sec. Ce dernier dépend de la nature des matériaux et de l'état des surfaces en contact (fig. III-1).

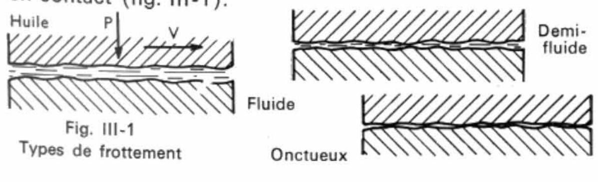


Fig. III-1
Types de frottement

2. LES LUBRIFIANTS

2.1. Rôles et propriétés d'un lubrifiant. — Son rôle principal est la diminution de la résistance au glissement. Il contribue aussi au refroidissement des pièces et les protège contre l'usure et contre la corrosion.

Un lubrifiant présente un certain nombre de propriétés qui doivent être adaptées aux conditions d'emploi (selon le cas : température d'ébullition élevée ou température de solidification basse). Il doit être neutre et avoir une grande stabilité chimique pour conserver ses propriétés dans le temps. Ses caractéristiques principales sont :

1° *La viscosité* qui caractérise la résistance au glissement fluide sur fluide et se mesure pratiquement en degré Engler (quotient de la durée d'écoulement de 200 cm^3 d'huile par la durée d'écoulement du même volume d'eau à travers le même tube de faible diamètre et à 20 °C). Elle diminue lorsque la température s'élève suivant une loi exponentielle propre à chaque lubrifiant (V. fig. III-2).

2° *L'onctuosité*, propriété d'adhérer plus ou moins aux matériaux ; elle caractérise l'aptitude du lubrifiant à former une mince couche entre les pièces.

3° *Le point éclair* qui est la température à laquelle les *vapeurs du lubrifiant* s'enflamment en présence d'une flamme.

4° *Le point de feu* qui est la température à laquelle le *lubrifiant lui-même* s'enflamme au contact d'une flamme.

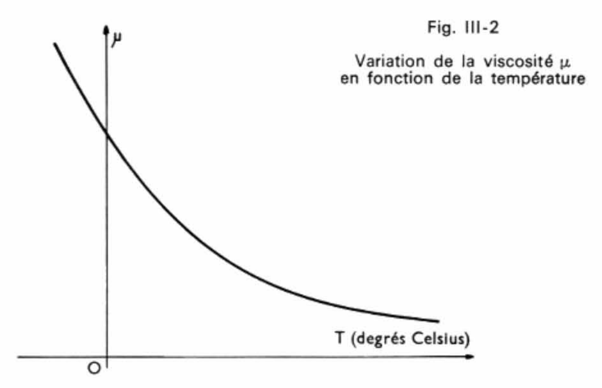


Fig. III-2

Variation de la viscosité μ en fonction de la température

2.2. Principaux lubrifiants

2.2.1. Huiles. — On utilise surtout des huiles minérales extraites du pétrole brut par distillation. Additionnées de produits chimiques (dopants), elles ont alors des propriétés particulières : huiles *détergentes* empêchant les dépôts de calamine, huiles *multigrades* conservant une viscosité sensiblement constante malgré les variations de température. On utilise aussi des huiles végétales ou animales, principalement les huiles de ricin et de colza. On emploie également des lubrifiants de synthèse comme les silicones.

2.2.2. Graisses. — Ce sont des émulsions, dans une huile minérale, de savons obtenus par saponification de graisses animales ou végétales. Très variées, elles présentent une gamme étendue de propriétés.

2.2.3. Lubrifiants solides. — Le graphite et le bisulfure de molybdène s'emploient directement ou en suspension dans une graisse.

3. LES RÉGIMES DE GRAISSAGE

3.1. Graissage fluide ou hydrodynamique

3.1.1. Formation du film d'huile. — Les paliers à graissage hydrodynamique sont caractérisés par l'existence, sauf aux instants du démarrage et de l'arrêt, d'un film d'huile continu qui sépare complètement les surfaces de l'arbre et du coussinet. La formation de ce film dépend de l'onctuosité du lubrifiant, ainsi que de l'inclinaison relative des surfaces. Son épaisseur augmente avec la viscosité et avec la vitesse relative des surfaces.

Quand une surface plane se déplace à une vitesse V sur une pellicule d'huile, d'épaisseur constante H, qui recouvre une surface fixe, du lubrifiant adhère aux surfaces : l'huile en contact avec la surface mobile est entraînée à la vitesse V et celle en contact avec la surface fixe reste immobile (fig. III-3). La couche de molécules en contact

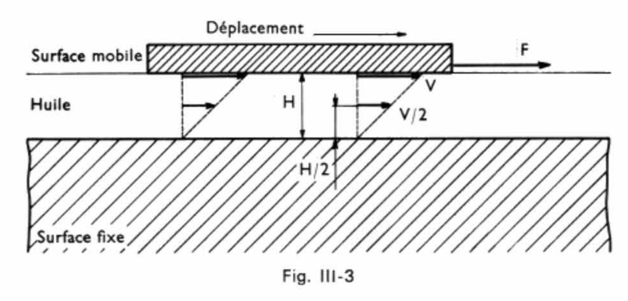


Fig. III-3

avec la surface mobile glisse sur la couche voisine qui glisse sur la suivante et ainsi de suite jusqu'à la couche adhérant à la surface fixe : leurs vitesses respectives varient de V à 0 et la force F qu'il faut exercer pour entraîner la surface mobile est fonction de la vitesse V et de la viscosité de l'huile. Les surfaces étant parallèles, la vitesse de chaque couche de lubrifiant est constante de l'entrée à la sortie de l'espace compris entre les surfaces. Il en est de même de la pression qui est égale à la pression régnant à l'extérieur de cet espace la surface mobile ne peut supporter aucune charge.

Si au contraire les surfaces font entre elles un angle α dans le sens du mouvement (fig. III-4), la diminution d'épaisseur de l'espace compris entre les surfaces oppose un obstacle au lubrifiant ; la pression augmente dans cet espace et la surface mobile peut supporter une charge importante sans entrer en contact avec la surface fixe si la viscosité et la vitesse sont suffisantes.

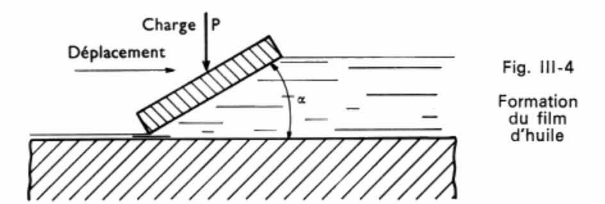


Fig. III-4

Formation du film d'huile

3.1.2. Paliers à charge axiale (butée). — La répartition de la pression sous un patin de palier de butée est indiquée par la figure III-5. Dans la direction transversale, du fait des fuites latérales, la pression diminue rapidement sur les côtés. La charge que le patin peut supporter est égale au produit de la pression moyenne par la surface du patin.

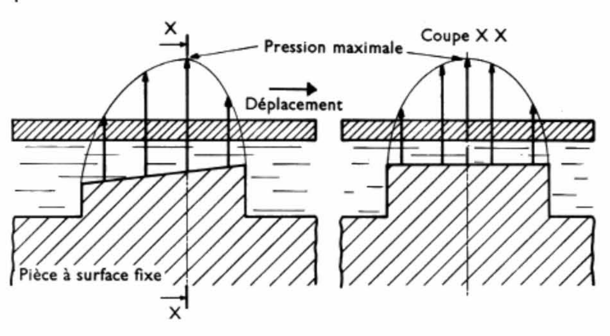


Fig. III-5 — Répartition de la pression dans le film d'huile d'un palier de butée

3.1.3. Paliers à charge radiale. — Quand la surface mobile et la surface fixe sont cylindriques, si la vitesse de rotation est suffisante, l'huile, entraînée dans l'espace en forme de coin, forme un film suffisant pour séparer l'arbre du coussinet malgré la charge appliquée à l'arbre.

— *Palier à coussinet partiel* (fig. III-6). — Il ne peut être utilisé que si la charge exercée sur l'arbre a une direction fixe.

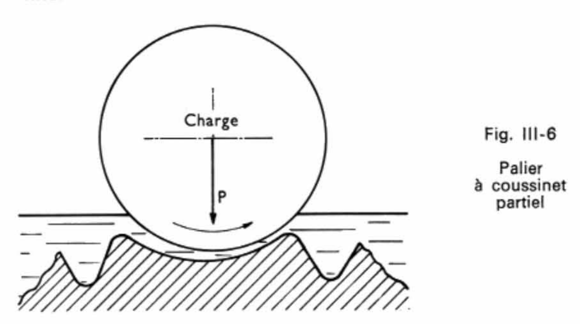


Fig. III-6

Palier à coussinet partiel

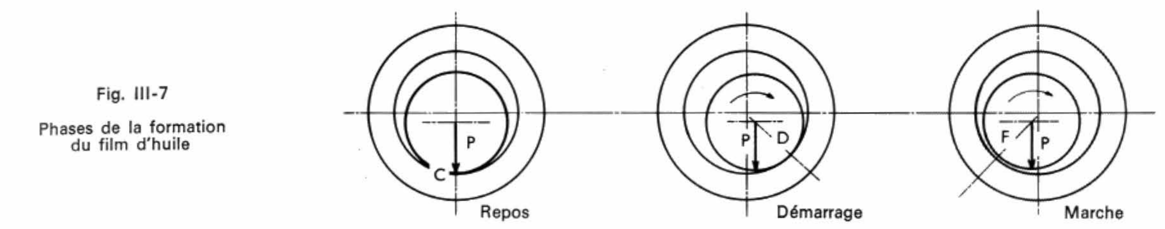
— *Palier à coussinet complet* (fig. III-7). — Il admet une direction de charge quelconque. Les phases de la formation du film d'huile sont les suivantes :

● *Au repos.* — L'alimentation d'huile est arrêtée et la majeure partie de l'huile s'est échappée. Les surfaces sont partiellement séparées par la couche moléculaire d'huile qui adhère au métal et, en certains points, l'arbre et le coussinet sont en contact direct sur la génératrice C.

● *Au démarrage.* — Un mouvement de rotation est imprimé à l'arbre et l'alimentation d'huile, ouverte, remplit le jeu. En raison des contacts directs existant entre les deux pièces, le frottement est élevé et l'arbre roule en grimpant sur le coussinet. Parvenu à une certaine hauteur, il glisse et le contact se stabilise momentanément sur la génératrice D.

Fig. III-7

Phases de la formation du film d'huile



• *En marche*. — Entraînée par l'arbre, l'huile forme un film d'épaisseur décroissante et une pression est ainsi créée sur le flanc droit de l'arbre qui est soulevé et ramené vers la gauche. À la vitesse de régime, l'arbre est supporté par un film dont l'épaisseur minimale se trouve en *F* et dont la pression équilibre le poids et la charge de l'arbre. Au-delà du point *F*, l'arbre et le coussinet forment un coin divergent où il existe une pression inférieure à la pression atmosphérique (fig. III-8). Le frottement, faible, ne résulte que du glissement des couches de lubrifiant les unes sur les autres.

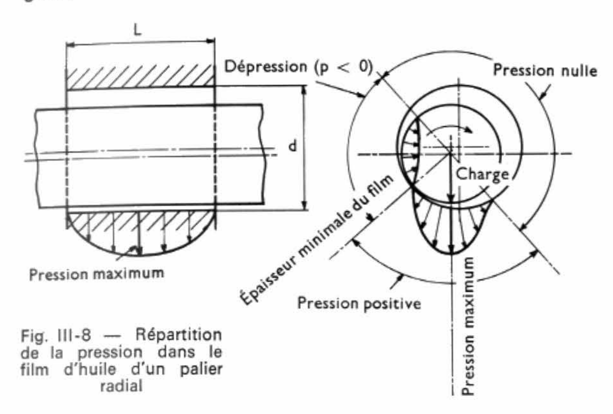


Fig. III-8 — Répartition de la pression dans le film d'huile d'un palier radial

3.1.4. Palier fluide. — Dans un palier ordinaire, au démarrage et dans la période qui précède l'arrêt, le graissage hydrodynamique est remplacé par le graissage onctueux : il se produit alors des contacts métal sur métal qui provoquent l'usure. Cet inconvénient est évité sur un type de palier, dit *palier fluide*, dont sont équipées certaines rectifieuses de précision (fig. III-9) : le coussinet comporte des chambres, séparées des rainures d'échappement par des cloisons et alimentées par des gicleurs. L'huile s'échappe par les jeux compris entre les cloisons et l'arbre. Si, sous l'action d'une force extérieure (par exemple, réaction de la pièce sur la meule) l'arbre se rapproche de certaines cloisons, les jeux correspondants sont diminués : la pression s'élève dans la chambre correspondante et elle décroît dans la chambre diamétralement opposée. Le centrage tend donc à se rétablir. De plus, la pression étant constamment maintenue, la broche reste toujours suspendue dans le fluide lubrifiant et n'entre jamais en contact avec le coussinet, qu'elle soit ou non en mouvement.

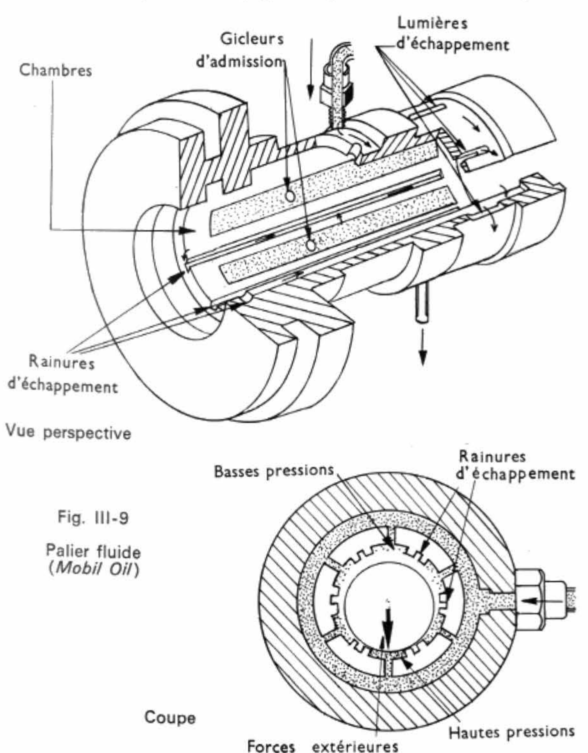


Fig. III-9

Palier fluide (*Mobil Oil*)

3.1.5. Propriétés exigées du lubrifiant. — Les conditions dans lesquelles se forme le film d'huile imposent que l'huile destinée aux paliers à graissage hydrodynamique aient les propriétés suivantes :

— *Viscosité*. — Elle ne doit pas être trop grande pour que l'alimentation d'huile soit immédiate au démarrage et elle doit être suffisante pour que le film sépare totalement les surfaces portantes dans les conditions de charge, de vitesse et de température atteintes en service.

— *Stabilité chimique*. — Elle doit être grande car elle permet à l'huile de résister à l'oxydation, de ne pas former de gomme ou de vernis et de ne pas s'épaissir en service. Il y a intérêt à employer des huiles dont la stabilité est renforcée par l'addition d'inhibiteurs d'oxydation.

— *Propriété antirouille*. — Elle est nécessaire pour protéger les surfaces métalliques lorsqu'il est impossible d'empêcher la présence d'eau dans le circuit ; elle peut être notablement augmentée par l'addition d'inhibiteurs spéciaux.

— *Démulsibilité*. — Elle doit être bonne pour assurer une séparation rapide de l'eau et empêcher la formation d'émulsions stables dont la viscosité est insuffisante.

— *Onctuosité*. — Elle doit être bonne pour protéger les pièces contre l'usure pendant les démarrages. Elle peut être accrue par l'adjonction d'additifs spéciaux.

3.2. Graissage onctueux. — Le graissage hydrodynamique n'est pas toujours réalisable, notamment pour des mouvements lents ou de faible amplitude et, même quand il est réalisé en marche, un régime *semi-fluide* ou *onctueux* existe au démarrage.

3.2.1. Vitesse critique. — Si l'on diminue progressivement la vitesse de l'arbre dans un palier à graissage hydrodynamique, le coefficient de frottement (rapport des composantes tangentielle et normale de l'action du palier sur l'arbre) décroît d'abord jusqu'à un minimum *A* (fig. III-10), puis il augmente jusqu'à l'arrêt. La vitesse correspondant à ce minimum est dite *critique* et marque la limite entre les deux régimes, hydrodynamique au-delà, et

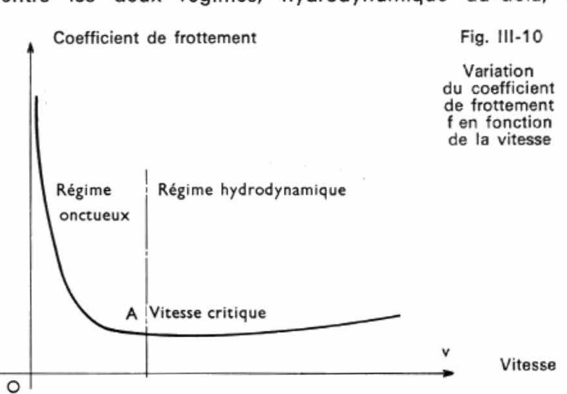


Fig. III-10

Variation du coefficient de frottement f en fonction de la vitesse

onctueux en deçà. Elle dépend de la nature des matériaux en contact, de l'état des surfaces, du rapport $\frac{L}{d}$ (V. fig. III-8) et de la viscosité du lubrifiant (l'augmentation de la viscosité permet de l'abaisser).

3.2.2. Coefficient de frottement. — En régime fluide, le coefficient de frottement, très faible, est dû uniquement à la résistance au glissement des couches d'huile entre elles et l'usure des pièces est nulle. En régime onctueux, dû au frottement métal sur métal, il est beaucoup plus grand, ainsi que l'usure des pièces. Cependant, quand la vitesse diminue en dessous de la vitesse critique, il croît d'abord lentement. Pour une vitesse égale à la moitié de la vitesse critique, il est encore très faible et il y a donc un domaine du régime onctueux qui est utilisable.

Ensuite, il croît rapidement et atteint, à très faible vitesse, la valeur 0,2 avec les lubrifiants usuels. Dans ce domaine des faibles vitesses, qui est donc néfaste à la conservation des surfaces frottantes, l'onctuosité est plus importante que la viscosité.

3.2.3. Surfaces frottantes. — Pour réaliser un régime onctueux satisfaisant, il faut un très bon état des surfaces frottantes et des matériaux de natures différentes (par exemple, arbre en acier trempé et rectifié sur coussinets garnis de métal antifriction). De plus, il faut $L > d$ (on adopte jusqu'à 3 d pour des coussinets à rotule).

4. DISPOSITIFS ET APPAREILS DE GRAISSAGE

4.1. Conditions à réaliser. — Les conditions auxquelles doivent satisfaire les appareils de graissage sont nombreuses; par exemple, sûreté de fonctionnement, continuité de l'alimentation, économie et, si possible, automaticité. Les constructeurs ont conçu des dispositifs variés, permettant notamment de constituer une réserve de lubrifiant (avec un remplissage et une vidange faciles) et de la répartir sur les surfaces mobiles en contact. De plus, dans les installations importantes, le graissage doit être commencé avant le démarrage et le réglage ainsi que le contrôle du débit, doivent être possibles pendant le fonctionnement.

Enfin, la récupération du lubrifiant devient nécessaire pour des raisons d'économie et de propreté dès que le débit est grand; dans ce cas, les fuites sont supprimées par des dispositifs d'étanchéité. À cet égard les dispositifs de graissage peuvent être classés en deux catégories: dispositifs à lubrifiant perdu et dispositifs à récupération du lubrifiant.

4.2. Dispositifs à lubrifiant perdu. — Après avoir rempli son rôle, le lubrifiant s'échappe par les fuites et doit être remplacé au fur et à mesure. Ces dispositifs à faible débit ne permettent qu'un graissage onctueux et sont utilisés pour des mouvements lents ou de faible amplitude.

4.2.1. Graisseurs à huile. — Les plus simples comportent un réservoir qui communique avec les surfaces à graisser (fig. III-11): leur débit, irrégulier, demande une surveillance continuelle.

On a cherché à régulariser le débit par différents systèmes:

— *Graisseur à mèche* (fig. III-12): composé d'un réservoir avec un tube central dépassant le niveau de l'huile, il comporte une mèche de coton dans laquelle l'huile chemine par capillarité. Bien que continu, le débit est difficilement réglable et les mèches doivent être fréquemment nettoyées.

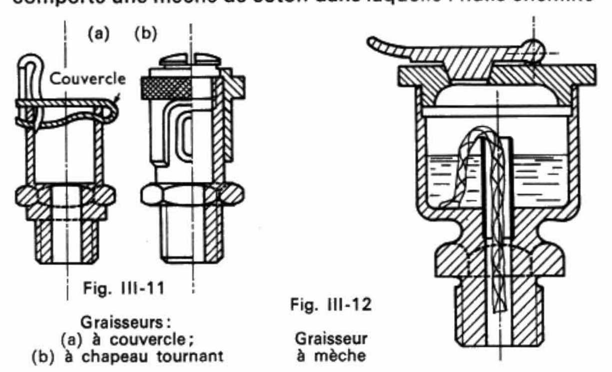


Fig. III-11
Graisseurs: (a) à couvercle; (b) à chapeau tournant

Fig. III-12
Graisseur à mèche

— *Graisseur à inertie* (fig. III-13): souvent employé en raison de la sûreté de son fonctionnement, son débit est régulier pendant la marche et nul pendant les arrêts. Il convient aux organes à mouvement alternatif qui donnent à la soupape de légères translations provoquant l'écoulement de l'huile. Pour avoir un débit déterminé, il exige toujours la même qualité d'huile.

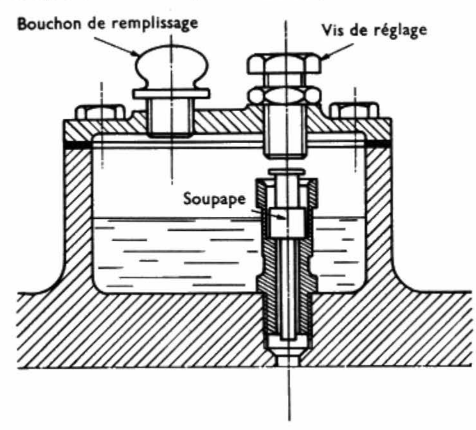


Fig. III-13 — Graisseur à inertie (lors des déplacements de la pièce, de l'huile passe dans la cuvette servant de logement à la soupape)

— *Graisseur compte-gouttes* (fig. III-14): réglable en marche, son débit est visible et réglé par un pointeau.

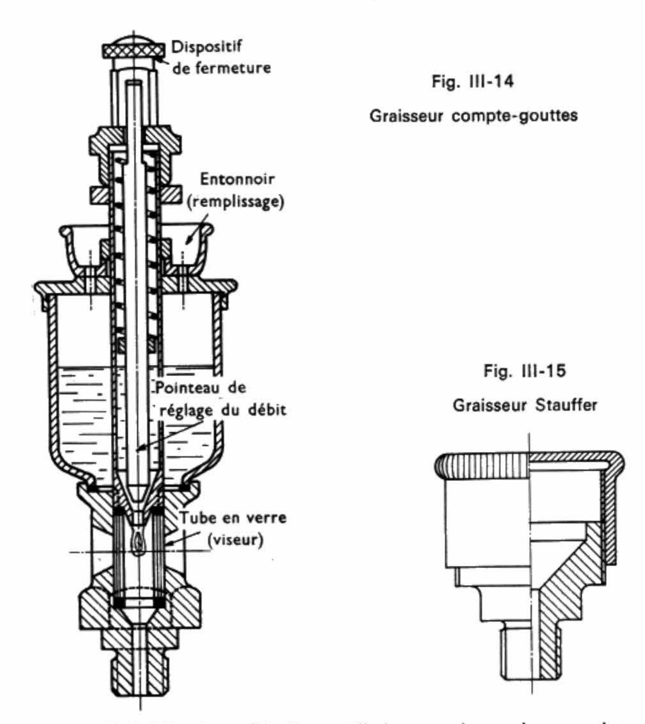


Fig. III-14
Graisseur compte-gouttes

Fig. III-15
Graisseur Stauffer

— *Pulvérisation d'huile:* utilisé pour le graissage des cylindres des moteurs à deux temps, ce procédé consiste à pulvériser l'huile dans le fluide moteur.

4.2.2. Graisseurs à graisse. — La graisse est utilisée, de préférence à l'huile, pour les mécanismes exposés aux intempéries (elle forme des bourrelets protecteurs aux extrémités du palier) ou lorsque la chaleur assure sa fusion. Ces graisseurs vont du simple graisseur à main au graisseur automatique:

— *Graisseur Stauffer* (fig. III-15): en vissant son couvercle, qui forme réservoir, on oblige la graisse à s'écouler par le trou central.

— *Graisseur automatique* (V. fig. III-16): proposé par G. Martin, le graisseur *G.V.* double permet le graissage sous

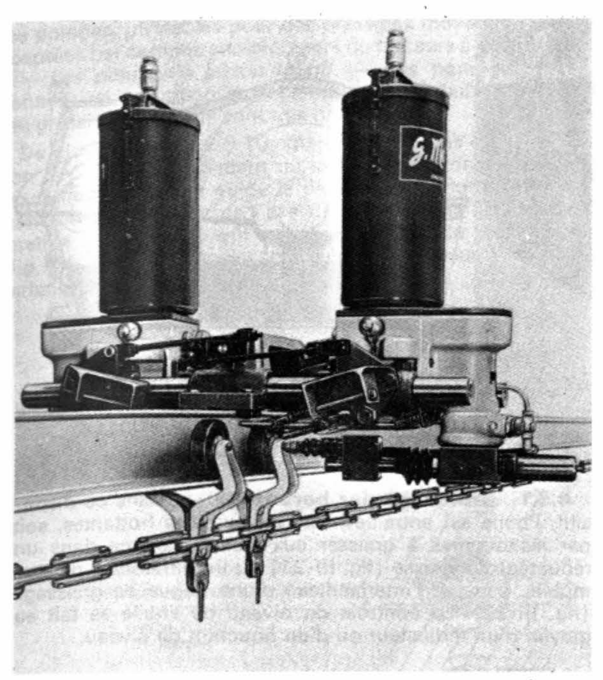


Fig. III-16 — Appareil de lubrification automatique à la graisse pour galets de convoyeur (*G. Martin*)

Deux conduites seulement, dites ligne double, réunissent la pompe aux diverses nourrices et sont obturées à leurs extrémités. Des tuyauteries secondaires relient chaque nourrice aux deux points de graissage qu'elle peut alimenter (sorties n° 1 et 2).

À chaque inversion du rôle d'une conduite de la ligne double (pression ou retour), le tiroir change de position (fig. III-17 a) et commande un aller du piston doseur qui expulse le lubrifiant par la sortie correspondante (fig. III-17 b). À l'inversion suivante, l'autre sortie est alimentée par le retour du piston (fig. III-17 d). Ensuite, le cycle recommence.

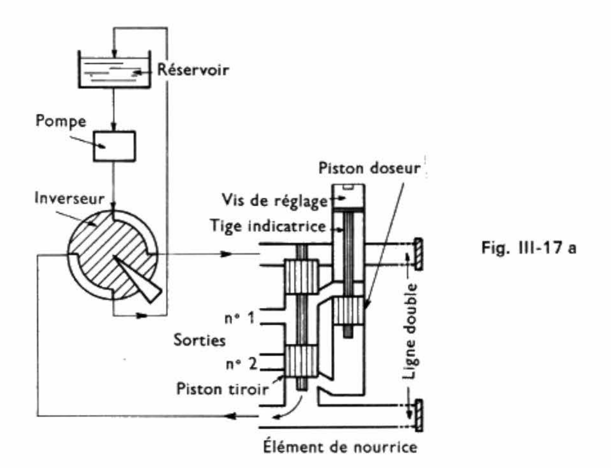
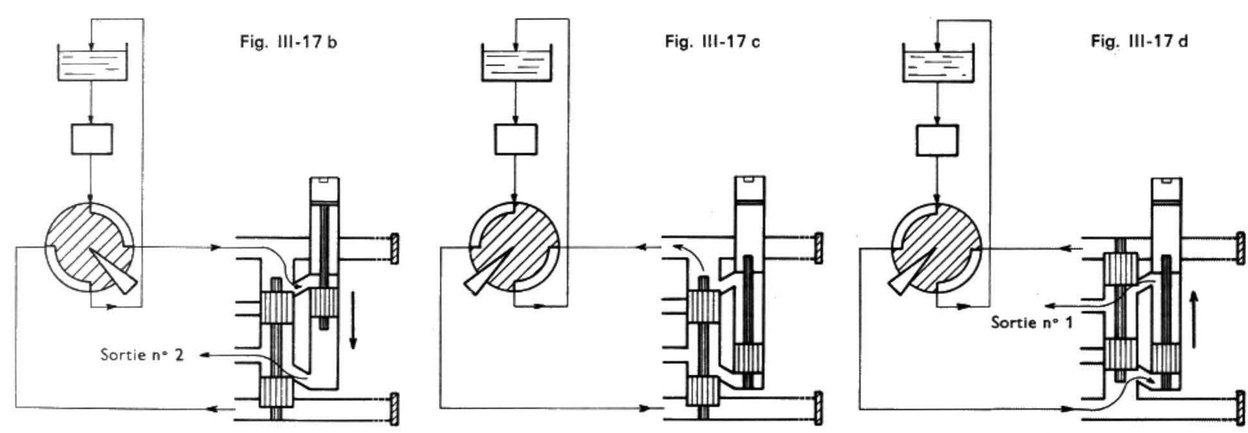


Fig. III-17 a



pression et en marche des axes de galets des convoyeurs aériens. Il fonctionne en empruntant son énergie au mouvement du convoyeur. Le débit et la pression sont réglables.

4.2.3. Graissage centralisé. — Les inconvénients majeurs du graissage par points séparés sont l'arrêt de la machine pour l'alimentation des graisseurs sans risques d'accident, la possibilité d'oubli de certains graisseurs et le coût de la main-d'œuvre.

1° *Graissage groupé à distance :* les points à graisser sont reliés par des canalisations de petit diamètre à leurs graisseurs qui sont regroupés sur un panneau central accessible. Cette amélioration convient pour un petit nombre de graisseurs car elle n'élimine pas le facteur humain et on a recherché des solutions rationnelles automatiques pour les installations importantes.

2° *Graissage central à ligne double* (*G. Martin*) *:* ce système fonctionne à l'huile ou à la graisse et se compose de deux éléments (fig. III-17) :

— *Une pompe volumétrique unique,* à commande manuelle ou automatique, à laquelle sont adjoints un réservoir de lubrifiant et un inverseur, sorte de robinet à quatre voies.

— *Des doseurs, appelés nourrices,* disposés à proximité des points à lubrifier. Chaque nourrice comporte, actionnés hydrauliquement par la pompe, un tiroir à course fixe et un piston doseur.

Remarques : Le débit de lubrifiant, proportionnel à la course du piston doseur, est commun pour les deux points alimentés par la même nourrice.

Les deux sorties d'une nourrice peuvent être réunies pour l'alimentation d'un seul point qui nécessite un débit important (fig. III-18).

La tige du piston doseur est indicatrice de son fonctionnement. Pour certaines applications (paliers sous-marins de dragues) les nourrices sont hermétiques et sans tige indicatrice.

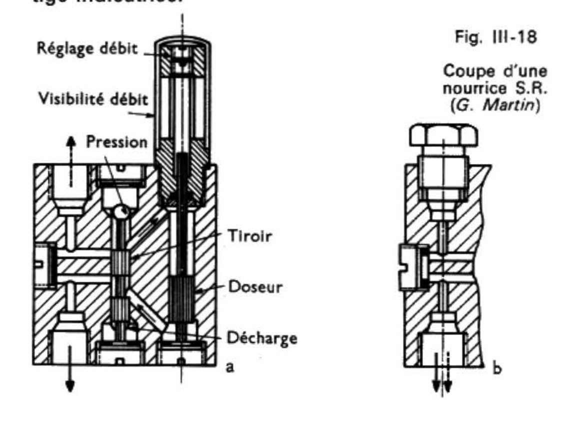
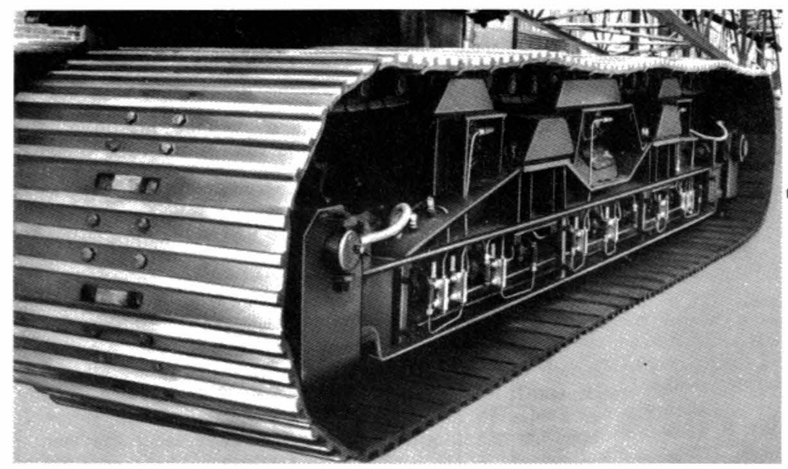


Fig. III-18

Coupe d'une nourrice S.R. (*G. Martin*)



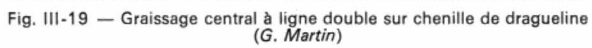


Fig. III-19 — Graissage central à ligne double sur chenille de dragueline (*G. Martin*)

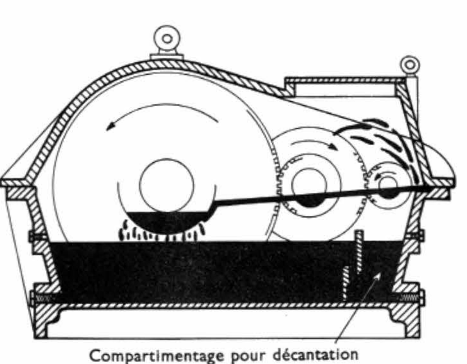


Fig. III-21 — Barbotage et projections dans un réducteur à engrenages (*Mobil Oil*)

— *Avantages du système :* fonctionnement entièrement hydraulique, pas d'organes délicats (bille, ressort, etc.), débit réglable en marche, contrôle visuel du fonctionnement, alimentation de chaque point indépendante de celle des autres et de la pompe, pression jusqu'à 175 bars, grand nombre de points de graissage (des installations dépassent mille points) et système extensible (fig. III-19).

3° *Graissage par brouillard d'huile :* le graissage de certaines pièces en mouvement (dents d'engrenages, chaînes, roulements, etc.) est plus facilement réalisé dans certains cas par un brouillard d'huile, c'est-à-dire par de l'huile, mise en suspension dans un flux d'air comprimé, et distribuée par une conduite unique aux gicleurs correspondant aux différents points à graisser. Le mélange air-huile est effectué au moyen d'un venturi dans un appareil de base, appelé graisseur, qu'il suffit de brancher sur un réseau d'air comprimé.

Il existe différents types de gicleurs : gicleurs à brouillard pour les roulements à billes et les engrenages intérieurs, gicleurs à semi-condensation pour chaînes ou engrenages extérieurs et gicleurs à condensation (sous forme de gouttelettes) pour coulisseaux, guidages, etc. (fig. III-20).

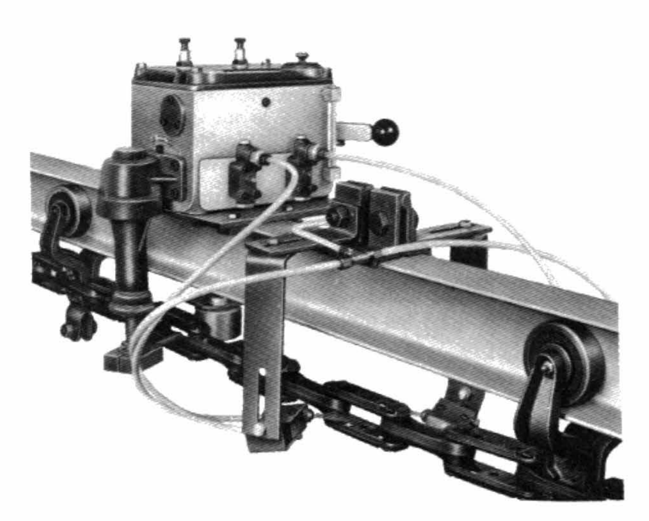


Fig. III-20 — Groupe de graissage par pulvérisation pour chaîne de convoyeur (*G. Martin*)

4.3. Dispositifs à récupération du lubrifiant. — Le lubrifiant décrit un circuit fermé sans pertes appréciables. Le débit peut être important et permettre un graissage hydrodynamique. Ces dispositifs sont toujours utilisés dans les mécanismes où la puissance est importante et dans les mécanismes étanches.

4.3.1. Graissage par barbotage. — Dans ce dispositif, l'huile est entraînée vers les surfaces frottantes, soit par les organes à graisser eux-mêmes comme dans un réducteur de vitesse (fig. III-21) ou un différentiel d'automobile, soit par l'intermédiaire d'une bague de graissage (fig. III-22). Le contrôle du niveau de l'huile se fait au moyen d'un indicateur ou d'un bouchon de niveau.

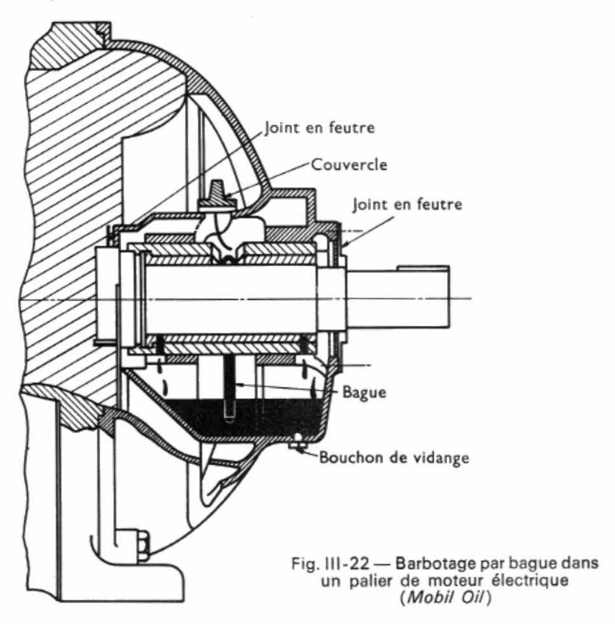


Fig. III-22 — Barbotage par bague dans un palier de moteur électrique (*Mobil Oil*)

4.3.2. Graissage par circulation sous pression. — Ce système est utilisé couramment dans les machines modernes (machines-outils, turbines, moteurs d'automobiles, moteurs d'avions, etc.). Capable d'un débit important de lubrifiant, il assure un bon refroidissement des organes en mouvement. Une pompe puise l'huile dans un réservoir et la refoule dans des canalisations allant aux différents points à lubrifier. L'huile est ensuite récupérée et retourne au réservoir : elle circule en circuit fermé ; si nécessaire, on installe un réfrigérant sur le circuit de refoulement et on contrôle la température de l'huile. Il faut surveiller régulièrement la pression donnée par la pompe et le niveau de l'huile dans le réservoir (appelé souvent carter).

1° *Pompes :* généralement rotatives, elles peuvent tourner à vitesse variable. Les plus usuelles sont :

— *Les pompes à engrenages.* — Simples et résistantes, elles fonctionnent uniquement en charge. Elles permettent d'atteindre des hautes pressions ; elles sont certainement les plus utilisées (moteurs d'automobiles, etc.).

— *Les pompes à palettes.* — L'huile est transportée entre le corps et le moyeu excentré à l'aide de palettes entraînées par le moyeu dans lequel elles glissent librement ;

ces pompes, utilisables pour des pressions moyennes, sont adoptées par certains constructeurs de moteurs à explosion.

— *Les pompes à piston rotatif.* — Ces pompes fonctionnent en aspiration et débitent, même à faible vitesse. Les pressions atteintes sont très grandes.

De plus, la pompe *UP* (G. Martin) a un sens de circulation de l'huile indépendant du sens de rotation : en effet, l'excentrique fixe qui guide le piston tourne automatiquement de 180° autour de l'axe de la pompe si le sens de rotation s'inverse, ce qui conserve le sens de circulation (fig. III-23). Elle convient pour des machines à vitesse variable et à changement de sens de marche.

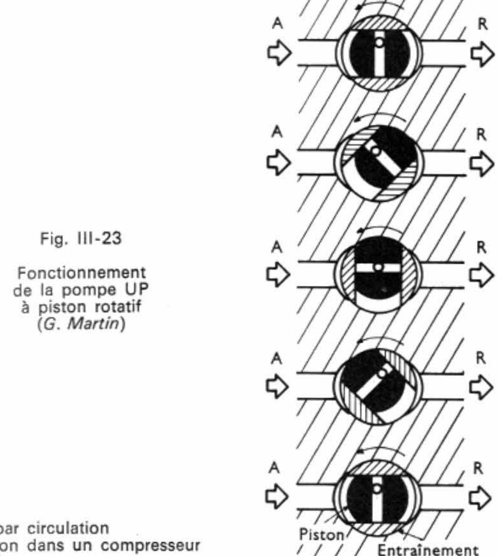


Fig. III-23

Fonctionnement de la pompe UP à piston rotatif (*G. Martin*)

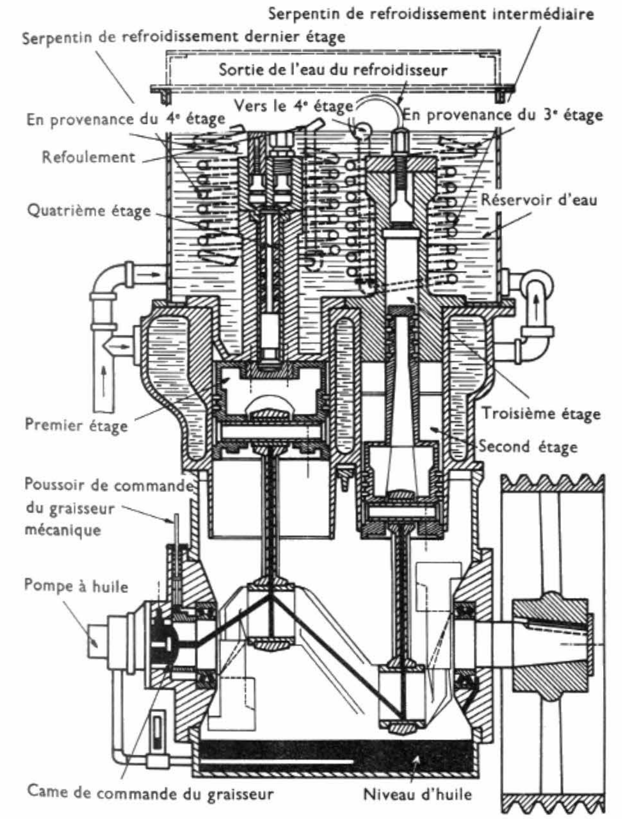


Fig. III-24

Graissage par circulation sous pression dans un compresseur (*Mobil Oil*)

2° *Distribution du lubrifiant*

— *Installations mobiles, ou de moyenne importance.* — La machine elle-même entraîne la pompe. L'huile sous pression parvient aux paliers à graissage hydrodynamique par des passages forés dans les pièces de la machine. Les fuites de ces paliers sont projetées sur les autres surfaces à graisser. S'il y a des roulements, ils reçoivent l'huile qui ruisselle le long des parois. C'est ainsi que sont graissés les moteurs à explosion et les compresseurs d'air (fig. III-24).

— *Installations fixes et importantes.* — La pompe est généralement entraînée par un moteur auxiliaire indépendant de la machine ; il permet de commencer le graissage avant mise en marche de celle-ci. Le débit d'huile propre, sous pression, de viscosité et température maintenues dans des limites définies, passe par les points à lubrifier, puis revient à sa source (fig. III-25).

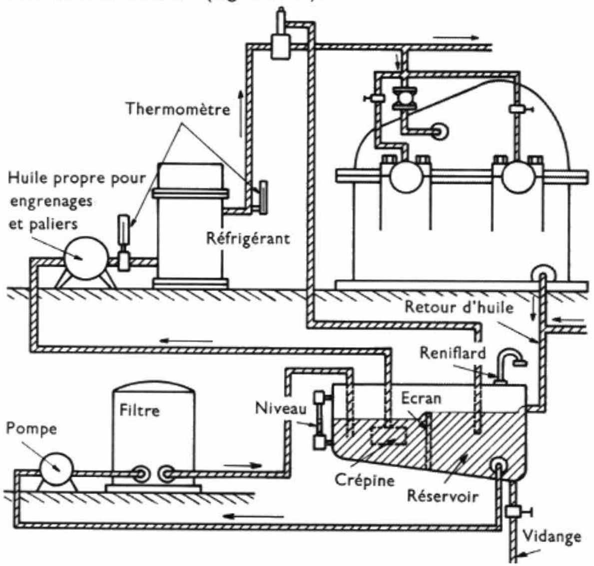


Fig. III-25 — Graissage par circulation sous pression d'un réducteur de vitesse (*Mobil Oil*)

3° *Surveillance :* dans les installations mobiles on se contente de contrôler la pression et, éventuellement, la température de l'huile. Dans les installations importantes, surtout à vitesse variable, la pression à la sortie de la pompe n'est pas une preuve de débit en tout point de l'installation. On peut alors utiliser un contrôleur de débit par point lubrifié : c'est un petit compteur volumétrique qui émet des impulsions électriques dont la durée est comparée au temps idéal mesuré par des temporisateurs. Toute anomalie, même celle d'un appareil de contrôle, déclenche l'alarme.

4.4. Épuration des huiles de graissage. — Les huiles de bonne qualité utilisées dans les systèmes de graissage par circulation sont prévues pour assurer de longues durées de service. Pour cela, il est nécessaire qu'elles soient protégées contre les impuretés qui peuvent pénétrer dans le circuit : les constructeurs reconnaissent l'importance de cette protection et utilisent des dispositifs soigneusement étudiés pour assurer l'étanchéité des arbres et des couvercles vis-à-vis de l'extérieur.

Néanmoins, il n'est pas possible d'empêcher complètement l'introduction de poussières. De plus, des fragments de rouille se détachent des parois internes des carters et des produits d'oxydation insolubles dans l'huile se forment à la longue. Aussi est-il nécessaire qu'une huile puisse être épurée en cours d'utilisation.

Les appareils employés pour l'épuration des huiles utilisent la séparation par différence de densité (décantation et centrifugation) et la séparation par différence de dimension ou par adsorption (filtration). On emploie aussi des filtres magnétiques pour éliminer les particules de métaux ferreux. Souvent, un même appareil utilise successivement plusieurs de ces procédés (V. fig. III-26 : décantation et double filtration, page suivante).

4.4.1. Décantation. — Elle est réalisée dans un réservoir de grande section où le lubrifiant reste presque au repos,

pendant une période suffisante pour que la séparation de l'eau et des particules solides plus denses que l'huile puisse avoir lieu. La séparation est d'autant plus rapide que l'huile est plus fluide. C'est pourquoi l'on monte souvent des serpentins de chauffage. Dans ce cas, la température ne doit pas dépasser 80 °C. On laisse ensuite l'huile refroidir, afin qu'elle puisse se séparer de certains produits d'oxydation insolubles à froid mais qui, à chaud, ont été mis en solution (V. fig. III-26).

4.4.2. Centrifugation. — Dans les appareils utilisés pour cette opération, la pesanteur est remplacée par la force d'inertie centrifuge : une fréquence de rotation de 7 000 à 15 000 tours par minute, donne une force de séparation équivalente à plusieurs milliers de fois celle de la pesanteur. Ces appareils s'avèrent particulièrement efficaces pour éliminer de grandes quantités d'eau ou des particules assez grosses.

4.4.3. Filtration

1° *Filtres à action mécanique :* dans ces appareils, l'huile envoyée sous pression traverse des matières qui lui offrent uniquement d'étroits passages (interstices et pores) dans lesquels les particules solides ne peuvent pas passer. Le type le plus simple est métallique : constitué par une toile ou par un ruban enroulé en hélice, il ne peut arrêter que les impuretés les plus grosses. Les types de filtres qui permettent d'intercepter les particules de petites dimensions sont par ordre d'efficacité :

— Les *filtres de surface* dans lesquels l'huile traverse un tissu ou une feuille de cellulose enroulée plusieurs fois autour d'un noyau central (fig. III-26).

— Les *filtres de profondeur* formés d'une cartouche filtrante épaisse, que l'huile traverse sur tout son épaisseur. Les cartouches sont constituées de déchets de coton, de fibres de cellulose ou de feutre (fig. III-26).

— Les *filtres à tranche* où l'huile traverse radialement des colonnes de disques de cellulose empilés et comprimés (fig. III-27).

2° *Filtres adsorbants :* ils contiennent, dans des cartouches amovibles, une terre finement divisée (argile activée ou terre à foulon) dont la très grande surface exerce une force d'attraction sur les produits d'oxydation solubles dans l'huile. Les produits d'oxydation insolubles et les impuretés solides ont été éliminés préalablement par un filtre à action mécanique. La terre adsorbant certains des additifs que les huiles de graissage peuvent contenir, on ne doit pas employer ces filtres, ni pour les huiles inhibées, ni pour les huiles détergentes.

4.4.4. Traitement des huiles de graissage

1° *Traitement périodique de la charge totale.* — La totalité de la charge d'huile usagée est vidangée. Cette vidange doit être effectuée immédiatement après l'arrêt, pour éviter que les impuretés en suspension dans l'huile chaude se déposent dans le circuit. Lorsque le volume d'huile est faible, on peut utiliser un appareil d'épuration mobile ; sinon l'huile est envoyée dans un atelier spécialisé.

2° *Traitement partiel continu par by-pass.* — On prélève 5 à 15 % du débit d'huile en circulation dans la canalisation principale et on les fait passer en dérivation dans l'appareil de traitement. L'huile épurée revient au réservoir. Le reste du débit assure le graissage de la machine (fig. III-28). Il suffit d'un appareil d'épuration de faible capacité puisqu'il ne traite qu'une partie du volume en service. L'épuration par by-pass est très intéressante lorsque le degré de pollution du lubrifiant n'est pas trop élevé.

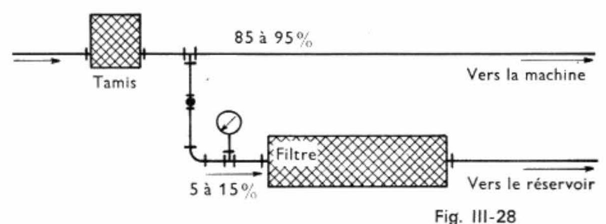
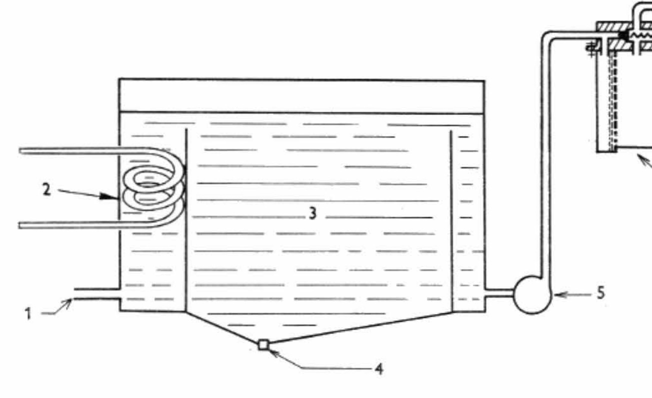


Fig. III-28

Épuration partielle continue par by-pass



1. Arrivée d'huile à épurer
2. Serpentin de chauffage
3. Réservoir de décantation
4. Vidange des boues
5. Pompe de circulation
6. Filtre de surface avec by-pass
7. Filtre de profondeur avec by-pass

Fig. III-26

Installation d'épuration d'huile

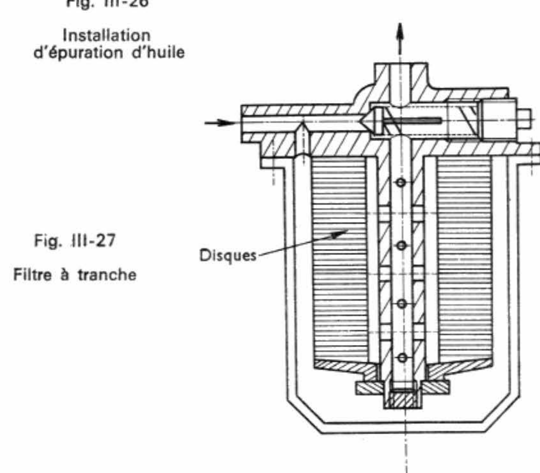


Fig. III-27

Filtre à tranche

3° *Traitement continu de la totalité du débit.* — Ce procédé doit être employé lorsque la pollution du lubrifiant est rapide (fig. III-29). Il impose une pompe plus puissante que le précédent pour maintenir le débit malgré la perte de charge due au filtre.

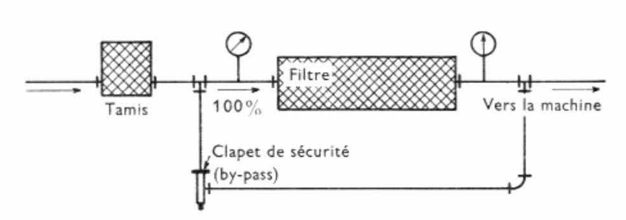


Fig. III-29 — Épuration continue par filtration de la totalité du débit

CHAPITRE IV

GUIDAGE EN ROTATION PAR ROULEMENTS

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Historique. — Le frottement de glissement qui se produit dans les paliers lisses entraîne une perte importante d'énergie. Aussi s'est-on efforcé très tôt de remplacer ces organes par des dispositifs dans lesquels le déplacement relatif serait obtenu par roulement entre les surfaces en contact.

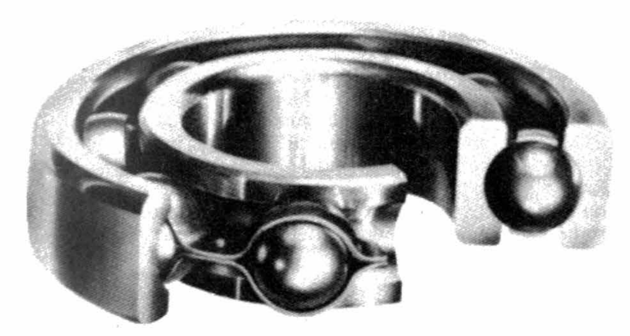


Fig. IV-1 — Roulement rigide à une rangée de billes (*S.K.F.*)

Les principes du roulement étaient connus dès l'Antiquité ; en 1928, on en a retrouvé un spécimen, assez rustique, sur une galère romaine mise à jour lors de l'assèchement du lac Némi (Italie) : il était destiné à permettre la rotation d'une statue que l'on pouvait ainsi admirer sous tous ses angles. Plus près de nous, Léonard de Vinci effectua de remarquables travaux sur les roulements à rouleaux. Mais, il fallut attendre 1870-1880 pour assister à la naissance, en Angleterre et en Allemagne, des premières usines de fabrication de billes. Elles étaient liées au développement de la bicyclette. Aux États-Unis d'Amérique, à la même époque, des essais de construction de roulements complets pour l'industrie mécanique étaient déjà entrepris.

En fait, le véritable essor du roulement date du début du siècle. Il est dû aux recherches théoriques effectuées par Robert Stribeck (recherches qui aboutirent à une meilleure connaissance de la technique du roulement) et au développement de l'industrie automobile, qui créa de très importants besoins.

1.2. Constitution et avantages. — Les roulements, à l'exception de certaines constructions spéciales, sont constitués par deux bagues, séparées par un ensemble d'éléments roulants (billes ou rouleaux) que maintient une cage. Cette cage répartit et sépare les éléments roulants. Elle les retient lors du montage et du démontage et empêche leur mélange avec ceux d'autres roulements. Cette dernière fonction est importante car, si la différence de diamètre entre éléments roulants d'un même roulement ne dépasse guère 0,001 mm, elle peut être sensiblement plus grande pour deux roulements de même type et de mêmes dimensions.

Les roulements dont l'angle de contact (angle formé par la droite d'action de la charge sur un élément roulant et un plan perpendiculaire à l'axe de rotation) est supérieur à 45° sont appelés *butées* et leurs bagues *rondelles*. Pour les roulements, les charges de base correspondent à des efforts exclusivement radiaux et pour les butées à des efforts exclusivement axiaux. Cependant, la plupart des types de roulements sont capables de supporter aussi un effort axial et certaines butées tolèrent un effort radial.

Par rapport aux coussinets lisses, les roulements et butées présentent les avantages suivants :
— économie de puissance de l'ordre de 15 à 30 % ;
— lubrification plus simple et plus économique ;
— lubrification efficace dès le démarrage qui est facilité ;
— possibilité de vitesses de rotation plus élevées ;
— faible sensibilité aux variations de vitesse et de charge ;
— réduction de l'encombrement ;
— facilité d'entretien.

2. DIFFÉRENTS TYPES DE ROULEMENTS

2.1. Roulements proprement dits

2.1.1. Roulement rigide à une rangée de billes (fig. IV-1). — Ce roulement comporte des chemins de roulement sans encoches de remplissage. Grâce à la profondeur des gorges, à la forte dimension des billes et au contact intime des billes et des gorges, ce roulement possède une grande capacité de charge, même dans le sens axial. Apte à supporter des charges de toutes directions, il peut même être employé pour des charges axiales à très grande vitesse.

Dans les petites dimensions, ces roulements peuvent être équipés de flasques en tôle ou de joints d'étanchéité en caoutchouc sur l'une des faces ou sur les deux (fig. IV-2). Les roulements avec deux flasques ou deux joints d'étanchéité sont garnis de graisse à la fabrication : il ne faut donc ni les laver ni les chauffer au montage.

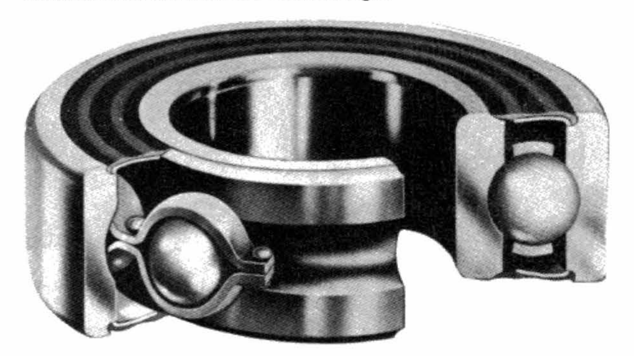


Fig. IV-2 — Roulement rigide à une rangée de billes avec joints d'étanchéité (*S.K.F.*)

2.1.2. Roulement à rotule sur deux rangées de billes (fig. IV-3). — Ce roulement a un chemin de roulement sphérique dans la bague extérieure. Grâce à cette construction, il supporte sans inconvénient de légers défauts d'alignement de l'arbre par rapport au logement (montage

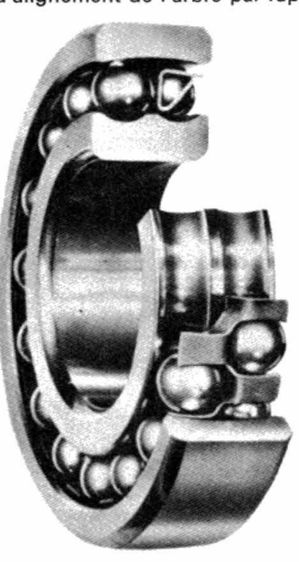


Fig. IV-3

Roulement à rotule sur deux rangées de billes (*S.K.F.*)

peu précis du palier ou flexion de l'arbre). Il est fabriqué aussi bien avec alésage conique pour montage sur manchon de serrage qu'avec alésage cylindrique.

2.1.3. Roulement à une rangée de billes à contact oblique (fig. IV-4). — Par suite du contact oblique, la capacité de charge axiale augmentant avec l'angle de contact, ce roulement est indiqué en cas de forte charge axiale dans un sens. Il doit toujours être monté avec un autre roulement pouvant supporter les poussées axiales dans l'autre sens. En général, il n'est pas démontable.

2.1.4. Roulement à deux rangées de billes à contact oblique (fig. IV-5). — Il s'apparente au précédent et supporte des poussées axiales importantes dans les deux sens. Il est construit avec un faible jeu interne (ou même avec un serrage initial), ce qui permet de limiter les déplacements de l'arbre si les charges axiales sont alternées. Il peut être utilisé dans des cas spéciaux où la partie tournante doit être montée sur un seul roulement. Il existe une version à deux demi-bagues intérieures démontables (fig. IV-6) utilisant des billes de plus grand diamètre : sa forte capactié de charge (radiale et axiale), la possibilité de fonctionnement avec serrage préalable et l'absence de réglage au montage sont des caractéristiques particulièrement intéressantes de ce roulement qui est maintenant très employé dans l'industrie automobile (moyeux de roues).

2.1.5. Roulement à rotule sur deux rangées de rouleaux (fig. IV-7). — Ce roulement comporte deux rangées de rouleaux avec chemin de roulement sphérique commun dans la bague extérieure : il s'aligne donc automatiquement. Le nombre des rouleaux et leurs dimensions lui assurent une très grande capacité de charge et il peut supporter également des efforts axiaux importants dans les deux sens. Les rouleaux dissymétriques sont guidés par l'épaulement médian de la bague intérieure.

Dans une exécution plus récente (fig. IV-8), une bague de guidage libre assure, avec la cage, le guidage des rouleaux symétriques : cette conception, grâce à l'augmentation de la longueur de contact des rouleaux sur les chemins de roulement, accroît beaucoup la capacité de charge. Ce roulement est à alésage cylindrique ou à alésage conique ; dans ce dernier cas on peut le fixer sur l'arbre à l'aide de manchons de serrage ou de démontage, ou même le monter directement sur une portée conique.

2.1.6. Roulement à rouleaux cylindriques (fig. IV-9). Dans ce roulement, les rouleaux sont guidés par des épaulements sur l'une des bagues. L'autre bague, libre, ne comporte pas d'épaulement et permet, dans certaines limites, un déplacement axial de l'arbre par rapport au logement. Le démontage est toujours facile même si les deux bagues sont montées à ajustement serré. Ce type de roulement supporte des charges radiales relativement

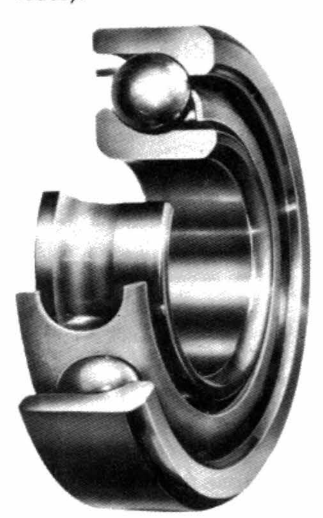


Fig. IV-4 — Roulement à une rangée de billes à contact oblique (*S.K.F.*)



Fig. IV-5 — Roulement à deux rangées de billes à contact oblique (*S.K.F.*)

Fig. IV-7 — Roulement à rotule sur deux rangées de rouleaux avec épaulement central de guidage (*S.K.F.*)



Fig. IV-8 — Roulement à rotule sur deux rangées de rouleaux avec bague de guidage libre (*S.K.F.*)

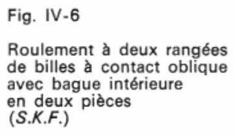
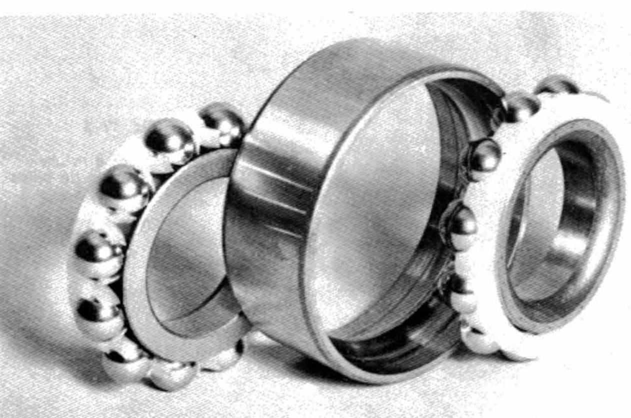


Fig. IV-6

Roulement à deux rangées de billes à contact oblique avec bague intérieure en deux pièces (*S.K.F.*)



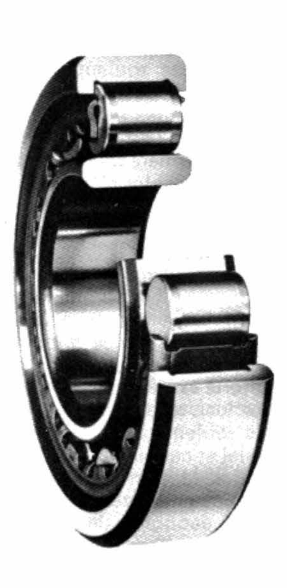


Fig. IV-9

Roulement à une rangée de rouleaux cylindriques (*S.K.F.*)



Fig. IV-10 — Roulement à deux rangées de rouleaux cylindriques (*S.K.F.*)

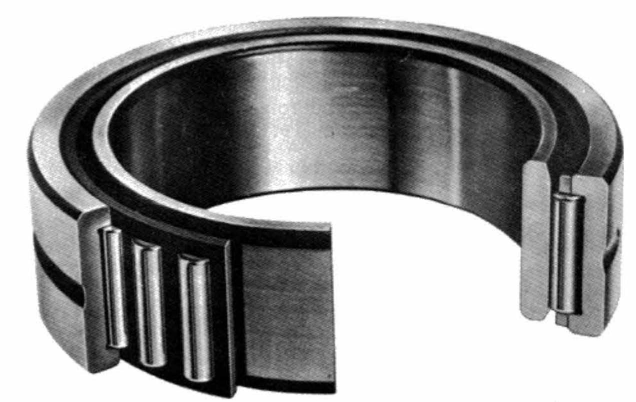


Fig. IV-11 — Roulement à aiguilles (*S.K.F.*)



Fig. IV-12 — Roulement à aiguilles sans bague intérieure (*S.K.F.-Werkfoto*)



Fig. IV-13 — Douille à aiguilles sans fond (*S.K.F.-Werkfoto*)

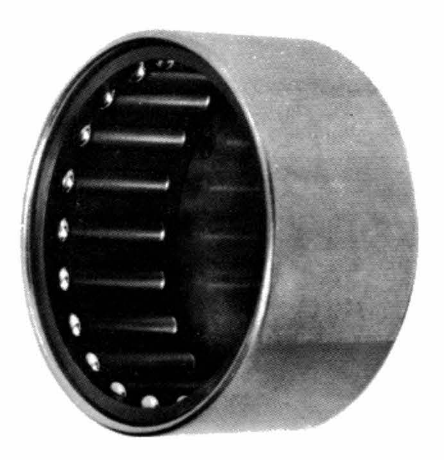


Fig. IV-14 — Douille à aiguilles avec fond (*S.K.F.-Werkfoto*)



Fig. IV-15 — Cage à aiguilles (*S.K.F.-Werkfoto*)

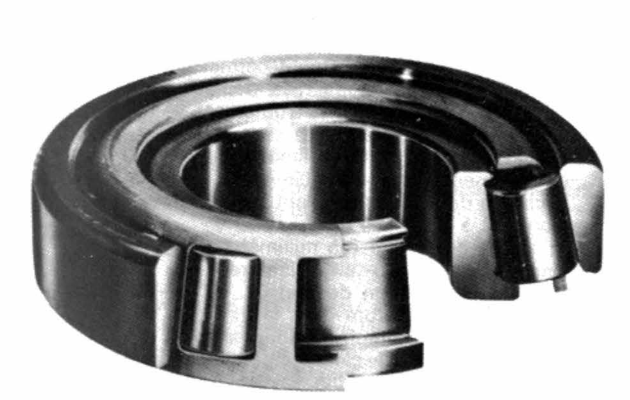


Fig. IV-16 — Roulement à rouleaux coniques (*S.K.F.*)

importantes et peut admettre des vitesses élevées. L'exécution où les deux bagues sont munies d'épaulements admet des charges axiales faibles.

Il existe une version à deux rangées de rouleaux dont l'exécution avec alésage conique (fig. IV-10) est destinée aux montages de grande précision (broches de machines-outils).

2.1.7. Roulement à aiguilles (fig. IV-11). — On peut considérer les roulements à aiguilles comme une variante des roulements à rouleaux cylindriques. Ils sont munis le plus souvent de cages en acier ou en matière plastique assurant le guidage et le maintien des aiguilles. Leur encombrement diamétral est faible. Ils peuvent être utilisés sans bague intérieure (fig. IV-12), les aiguilles roulant directement sur l'arbre, qui doit être traité et rectifié. Il existe des douilles à aiguilles dont la bague extérieure très mince, est obtenue par formage (fig. IV-13). Cette bague peut comporter un fond (fig. IV-14) pour le montage de paliers d'extrémité étanches. Il existe également des cages à aiguilles : montées directement entre logement et arbre, elles permettent d'obtenir un encombrement diamétral minimal (fig. IV-15). Enfin, on peut employer des aiguilles seules pour des mouvements oscillants ou à faible vitesse.

2.1.8. Roulement à rouleaux coniques (fig. IV-16). — Ce roulement, par suite de la position oblique des rouleaux et des chemins de roulement, est particulièrement adapté aux charges radiales et axiales simultanées. Il doit toujours être monté en opposition avec un autre roulement pouvant absorber les efforts axiaux de sens inverse. Il est démontable en deux éléments : le cône assemblé (bague intérieure munie de ses rouleaux) et la bague extérieure. Pour les applications où la poussée axiale est très importante, on utilise des roulements à grand angle de contact.

2.2. Butées

2.2.1. Butée à billes à simple effet (fig. IV-17). — Elle possède une rangée de billes roulant entre deux rondelles, la rondelle-arbre et la rondelle-logement. Elle ne supporte que des charges axiales et dans un seul sens.

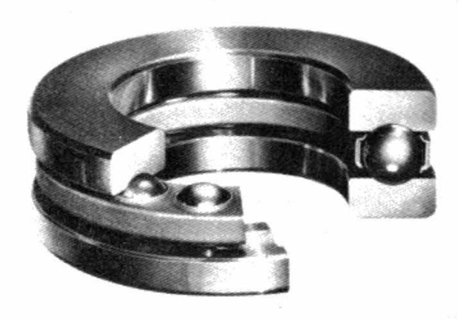


Fig. IV-17 — Butée à billes à simple effet (*S.K.F.*)

2.2.2. Butée à billes à double effet (fig. IV-18). — Elle comporte deux rangées de billes, une pour chaque sens de charge, et trois rondelles : la rondelle-arbre au milieu et les rondelles-logement de part et d'autre. Elle ne supporte que des charges axiales.

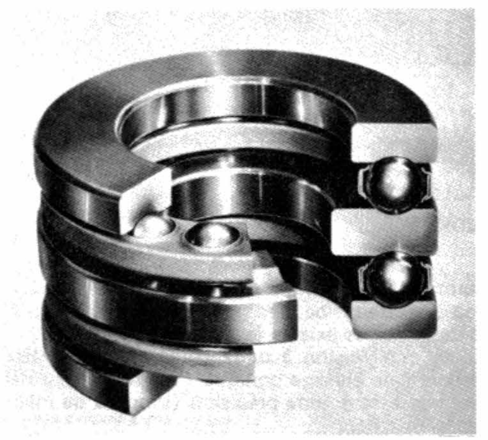


Fig. IV-18 — Butée à billes à double effet (*S.K.F.*)

2.2.3. Butée à rotule sur rouleaux (fig. IV-19). — Cette butée possède une rangée de rouleaux placés obliquement, guidés par un large épaulement de la rondelle-arbre et roulant sur une surface sphérique de la rondelle-logement. Elle a donc, à la fois, une capacité de charge axiale très élevée et une capacité de charge radiale appréciable. Elle est conçue pour fonctionner malgré un défaut d'alignement. Grâce à la forme particulière de la surface de contact des rouleaux et de l'épaulement de guidage, les rouleaux

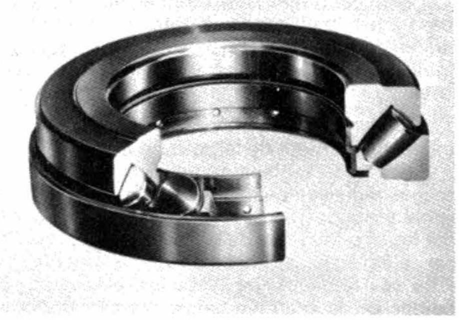


Fig. IV-19 — Butée à rotule sur rouleaux (*S.K.F.*)

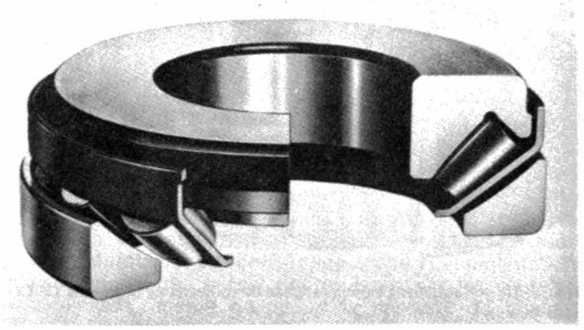


Fig. IV-20 — Butée à rotule sur rouleaux avec cage en tôle (*S.K.F.*)

sont, toujours séparés de l'épaulement par un film d'huile pendant le fonctionnement. Cette butée peut donc être employée à des vitesses élevées, même sous de très fortes charges. À cause de sa cage massive, elle doit être lubrifiée à l'huile, sauf à très faible vitesse. Dans une version récente (fig. IV-20), la cage en tôle emboutie facilite la lubrification.

2.3. Roulements et butées de types spéciaux. — Les types de roulements et de butées précédents, utilisés couramment, sont fabriqués en très grande série. On emploie aussi d'autres types, conçus et fabriqués pour des applications particulières :

— roulements à billes à quatre points de contact par bille ;
— cages à billes (rotation et translation simultanées) ;
— couronnes à rouleaux croisés (couronnes d'orientation) ;
— butées à billes à contact oblique ;
— butées à rouleaux cylindriques ou à aiguilles ;
— butées à rouleaux coniques.

Remarque : d'autres dispositifs exploitent les avantages du roulement entre les surfaces en contact. Ils assurent le guidage en translation (rails à chemins rectilignes avec plaquettes à billes ou avec rouleaux cylindriques croisés) et même le guidage hélicoïdal (système vis-écrou à circulation de billes).

3. CALCUL DES ROULEMENTS

3.1. Tensions et déformations. — La surface de contact entre deux corps élastiques appliqués l'un contre l'autre par une force dépend, en forme et en grandeur, des rayons de courbure principaux des deux corps au point de contact et de l'intensité de la force. On peut calculer cette surface, la pression entre les corps et les tensions dans les matériaux, à partir de la théorie de Hertz, tant que la limite élastique des matériaux n'est pas dépassée, ce qui est le cas des roulements et butées normalement chargés. Les formules correspondantes sont complexes et les calculs numériques nécessitent l'emploi de tableaux des valeurs de plusieurs variables auxiliaires (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 11).

La formation de la surface de contact s'accompagne d'un rapprochement des deux corps, par déformation élastique. L'expression de ce déplacement permet d'établir des formules directement utilisables du déplacement de l'arbre par rapport au logement du roulement. Ainsi, avec les notations suivantes :

δ_r déplacement radial (en millimètres),
δ_a déplacement axial (en millimètres),
$Q_{\max}$ charge de l'élément roulant le plus chargé (en décanewtons ; V. § 3.2),
D_w diamètre de la bille (en millimètres),
l_w longueur du rouleau (en millimètres),
α angle de contact (en degrés) (V. fig. IV-21 ; § 3.2),
le déplacement de l'arbre dans la direction de la charge, dans les cas les plus simples, a pour valeur :

— Roulements à billes, charge purement radiale :

$$\delta_r = \frac{0{,}0025}{\cos\alpha}\sqrt[3]{\frac{Q_{\max}^2}{D_w}}$$

— Roulements à rouleaux, charge purement radiale :

$$\delta_r = \frac{0{,}006}{\cos\alpha}\,\frac{Q_{\max}^{0,9}}{l_w^{0,8}}$$

— Butées à billes, charges purement axiale :

$$\delta_a = \frac{0{,}0024}{\sin\alpha}\sqrt[3]{\frac{Q_{\max}^2}{D_w}}$$

Ces valeurs sont des ordres de grandeur, le coefficient numérique étant la valeur moyenne de chaque grand type de roulement. Dans le cas de charges alternées, le déplacement est $2\delta + j$, avec j, jeu interne du roulement ou jeu résiduel de la butée après réglage.

Lorsque les efforts exercés sur le roulement sont importants, des déformations permanentes (empreintes de billes ou de rouleaux sur les pistes) apparaissent. Leur calcul ne peut plus se faire suivant la théorie de Hertz et les formules correspondantes sont très compliquées.

3.2. Répartition des efforts. — Dans un roulement radial, à une rangée de billes, par exemple, une charge radiale pure n'est supportée que par une partie des éléments roulants. En outre, ils ne subissent pas tous le même effort : le plus chargé se trouve dans la direction de la charge ; sur les autres, l'effort diminue lorsqu'on s'écarte angulairement de cette direction et il est nul à 90°.

Dans un roulement à contact oblique soumis à une charge radiale et à une charge axiale simultanées, la répartition des efforts sur les éléments roulants est plus complexe et dépend de l'importance relative des charges axiale et radiale (fig. IV-21).

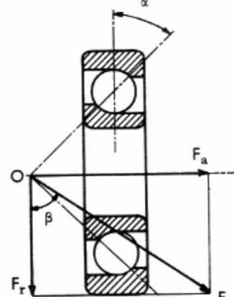


Fig. IV-21 — Décomposition d'une charge quelconque F en composantes axiale pure F_a et radiale pure F_r

O : centre de pression
α : angle de contact
(α = 0° pour les roulements à contact droit ; α = 20 à 40° pour les roulements à contact oblique courant ; α = 90° pour les butées)

On a, avec les notations suivantes :

$Q_{\max}$ charge sur l'élément roulant le plus chargé (en décanewtons),

F_r charge radiale exercée sur le roulement (en décanewtons),

F_a charge axiale exercée sur le roulement (en décanewtons), k variable de 3,93 (pour $\frac{F_a}{F_r} = 1{,}7$) à 5,00 (pour $F_a = 0$)

k' variable de 2,36 (pour $\frac{F_a}{F_r} = 1{,}7$) à 1,00 (pour $F_r = 0$),

z nombre d'éléments roulants,

α angle de contact (en degrés),

— Roulements à billes ou à rouleaux ($\alpha = 0°$) :

$$Q_{\max} = \frac{5\,F_r}{z}$$

— Roulements à billes à contact oblique :

$$Q_{\max} = \frac{k\,F_r}{z\cos\alpha} \quad \text{si } \frac{F_a}{F_r} \leqslant 1{,}7$$

$$Q_{\max} = \frac{k'\,F_a}{z\sin\alpha} \quad \text{si } \frac{F_a}{F_r} \geqslant 1{,}7$$

— Butées à billes normales (la charge est également répartie si elle est dans l'axe de la butée) :

$$Q_{\max} = \frac{F_a}{z\sin\alpha}$$

3.3. Charges admissibles sur un roulement. — Le calcul d'un roulement ne peut être fait de la même manière selon qu'il est en rotation ou à l'arrêt :

— en rotation, c'est la fatigue du métal, résultant des passages successifs des éléments roulants en un même point des bagues, qui conditionne la charge admissible ;

— à l'arrêt, c'est la déformation permanente des bagues.

Il a donc été nécessaire de définir deux capacités de charge, l'une C_0 (charge statique de base) utilisable à l'arrêt ou à vitesse très faible, l'autre C (charge dynamique de base) utilisable lorsque le roulement tourne à une vitesse appréciable. Les catalogues des constructeurs donnent ces deux valeurs pour chaque dimension de roulement.

3.3.1. Charge statique de base C_0. — Quand la charge appliquée sur un roulement au repos augmente, il n'existe pas de limite nettement marquée au-delà de laquelle apparaissent des déformations permanentes des chemins de roulement aux points de contact des éléments roulants ; elles augmentent progressivement et la charge C_0 est celle pour laquelle la profondeur de la déformation permanente de la bague sous l'élément roulant le plus chargé est le dix-millième du diamètre de cet élément.

La charge maximale admissible sur un roulement au repos varie de 0,5 à 2 C_0 selon la qualité de fonctionnement exigée lors d'une rotation ultérieure (régularité, précision, silence). Dans certains cas (roulements des commandes de vol) on peut admettre des valeurs supérieures. La rupture n'intervient que sous une charge de l'ordre de 5 à 8 C_0.

Même pour des roulements en rotation, la charge statique de base peut quelquefois être déterminante. En cas de chocs caractérisés ou pour avoir une stricte exactitude de rotation, il est conseillé de ne pas dépasser 0,5 C_0. Dans des conditions normales de fonctionnement, C_0 constitue la limite de la charge admissible. Si la charge agit régulièrement, les déformations réparties sur tout le chemin de roulement n'entraînent pas d'irrégularités de fonctionnement et la charge admissible peut atteindre 2 C_0.

3.3.2. Charge dynamique de base C et durée d'un roulement. — Dans un roulement en rotation, il arrive un moment où se produit un écaillage, par fatigue du métal de la bague la plus chargée, mettant le roulement hors d'usage. La durée d'un roulement est le nombre de tours réalisé jusqu'à cet écaillage. Toutes conditions égales par ailleurs, cette durée varie d'un roulement à un autre d'une même série. On a donc dû définir une durée nominale : c'est la durée atteinte ou dépassée par 90% des roulements de la série dans les mêmes conditions d'essais. La durée moyenne, atteinte ou dépassée par 50 % des roulements, est égale à cinq fois la durée nominale. Donc, le calcul d'un roulement basé sur sa durée nominale donne toute probabilité pour que la durée calculée soit largement dépassée par la plupart des roulements en fonctionnement.

La durée nominale est fonction de la charge exercée sur le roulement. Par définition, la charge dynamique de base C est la charge constante de direction fixe qui donne une durée nominale d'un million de tours pour la bague intérieure (la plus chargée). Cette charge, radiale pour les roulements, axiale et centrée pour les butées, est déterminée par des essais systématiques.

Si la charge P appliquée au roulement est supérieure à C, la durée nominale sera inférieure à un million de tours et réciproquement. On a établi expérimentalement les relations fondamentales suivantes dites *formules de durée :*

— roulements et butées à billes : $L = \left(\frac{C}{P}\right)^3$

— roulement et butées à rouleaux : $L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$

avec :

L durée nominale en millions de tours,

C charge dynamique de base (en décanewtons),

P charge équivalente sur le roulement (en décanewtons) (V. § 3.4).

On peut exprimer la durée nominale en heures (L_h) si on connaît la vitesse de rotation.

Pour le calcul d'un roulement, la durée nominale adoptée en pratique varie de 500 à 200 000 heures, selon que l'application à réaliser est peu exigeante (portes coulissantes, par exemple) ou doit, au contraire, présenter une grande sécurité (machines de centrales électriques).

3.4. Charge équivalente. — Les charges réelles appliquées à un roulement sont très diverses : radiales ou (et) axiales, variables en intensité et (ou) en direction, etc. Pour

pouvoir les comparer à la charge dynamique de base, il est nécessaire de calculer la charge constante de même nature que celle-ci, dite charge équivalente, qui donnerait au roulement la même durée nominale que les charges réelles.

3.4.1. Charge constante en intensité et en direction. — Une telle charge F peut être décomposée en une charge radiale pure constante F_r et une charge axiale pure constante F_a (V. fig. IV-21). La charge équivalente est alors :

$$P = XF_r + YF_a$$

où X et Y sont des coefficients qui dépendent du type de roulement choisi, du rapport $\frac{F_a}{F_r}$ et, parfois, du rapport $\frac{F_a}{C_0}$. Les catalogues des constructeurs indiquent les valeurs de ces coefficients.

3.4.2. Charge périodique en intensité et en direction. — La loi de variation de la charge en fonction du nombre de tours N étant connue, la charge F est d'abord décomposée en ses composantes radiale et axiale en fonction de N, soit :

$$F_r = f(N) \text{ et } F_a = g(N)$$

La charge équivalente P a pour valeur :

$$P = \sqrt[3]{\frac{1}{N_0}\int_0^{N_0} [Xf(N) + Yg(N)]^3 \, dN}$$

N_0 est le nombre de tours effectués pendant un cycle (ou période) de variation de F.

Pour les roulements et butées à rouleaux, il faudrait prendre l'exposant $\frac{10}{3}$ au lieu de 3 mais, en pratique, l'approximation est suffisante.

Si la vitesse est constante, les nombres de tours N et N_0 peuvent être remplacés par les temps t et t_0 correspondants.

Enfin, si la charge varie par paliers, on peut remplacer l'intégrale par une somme algébrique :

$$P = \sqrt[3]{\frac{1}{N_0} \Sigma \, [XF_{ri} + YF_{ai}]}$$

où : $N_0 = N_i$; avec F_{ri} et F_{ai}, charges radiale et axiale constantes qui s'exercent pendant N_i tours.

3.4.3. Cas des roulements à contact oblique. — Lorsque de tels roulements, toujours montés deux par deux, en opposition, supportent une charge radiale, celle-ci donne naissance à une poussée axiale dont il faut tenir compte dans les calculs (fig. IV-22) et dont la valeur, en pratique, peut être estimée à :

$$F_a = \frac{0{,}5 \, F_r}{Y}$$

avec : F_r, charge radiale et Y, coefficient de transformation des charges axiales en charges radiales équivalentes du roulement considéré (V. § 3.4.1). Ainsi, sur la figure IV-22, la charge axiale totale qui s'exerce sur le roulement I est :

$$K_a + \frac{0{,}5 \, (F_r)_{II}}{Y_{II}}$$

avec : K_a, charge axiale extérieure ; celle qui s'exerce sur le roulement II est :

$$0{,}5 \, \frac{(F_r)_I}{Y_I}$$

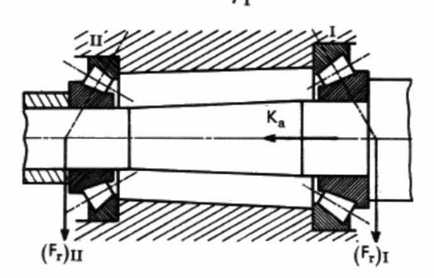


Fig. IV-22

3.5. Calcul pratique d'un roulement

3.5.1. Détermination des charges appliquées. — On isole l'arbre et toutes les pièces qui en sont solidaires. L'inventaire des forces extérieures est en général facile : poids des pièces en mouvement, efforts exercés sur les organes de transmission (poulies, engrenages, manivelles), efforts centrifuges ou d'inertie, poussées aérodynamiques, etc. On calcule les réactions des appuis de l'arbre que constituent les roulements : la charge réelle appliquée à chaque roulement est égale et opposée à la réaction d'appui correspondante.

3.5.2. Choix du roulement. — La charge réelle est transformée en charge équivalente : celle-ci, par comparaison avec les charges statique de base C_0 et dynamique de base C, indiquées par les catalogues, permet de choisir le type et la dimension du roulement dont la qualité de fonctionnement et la durée nominale seront satisfaisantes pour l'application envisagée. Ainsi, pour une transmission par courroies (fig. IV-23), les charges équivalentes purement radiales étant de 211, 412 et 217 daN, respectivement, pour les appuis (1), (2) et (3), on choisira : pour (1) et (3) des roulements à rotule sur billes d'alésage 50 mm (par exemple : roulement S.K.F. n° 1211) et pour (2) un roulement à rotule sur billes d'alésage 50 mm (par exemple : roulement S.K.F. n° 1311), qui donnent environ 18 000 heures de durée nominale, soit dix ans pour un fonctionnement de 8 heures par jour.

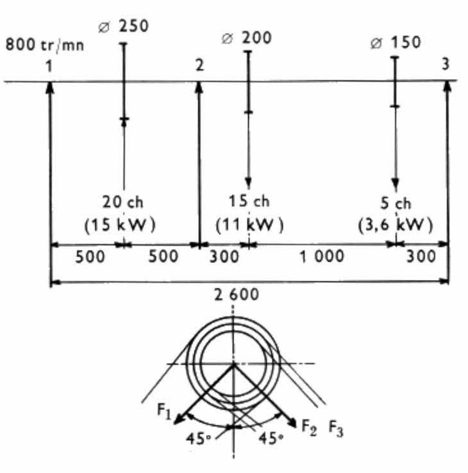


Fig. IV-23 — Exemple de calcul d'une transmission par courroies

4. LUBRIFICATION DES ROULEMENTS

4.1. Généralités. — Tous les roulements à billes ou à rouleaux peuvent être lubrifiés soit avec une graisse spéciale pour roulements, soit avec une huile minérale. Indépendamment de ses qualités lubrifiantes, la graisse contribue à l'obturation des paliers, de sorte que l'huile n'est généralement utilisée que si une raison particulière l'impose (par exemple, vitesse trop élevée). On se sert également d'huile quand les éléments voisins de la machine, notamment les engrenages, doivent recevoir le même lubrifiant que les roulements. Les butées à rotule sur rouleaux exigent dans la plupart des cas une lubrification à l'huile.

4.1.1. Lubrification à la graisse. — Pour la plupart, les roulements n'ont besoin d'être lubrifiés qu'une ou deux fois par an. La fréquence de graissage dépend essentiellement du type et de la dimension du roulement, ainsi que de la vitesse de rotation (V. fig. IV-24). Dans les roulements étanches, la consommation est si faible qu'il n'est souvent pas nécessaire d'effectuer de graissage d'appoint. La quantité de graisse, en centimètres cubes, nécessaire à chaque appoint peut être déterminée approximativement par la formule : 0,005 $D.B$; D étant le diamètre extérieur et B la largeur du roulement, en millimètres.

Si la température de fonctionnement est supérieure à 70 °C, la durée de l'intervalle de lubrification t_f est réduite de moitié pour chaque augmentation de 15 °C de la tempé-

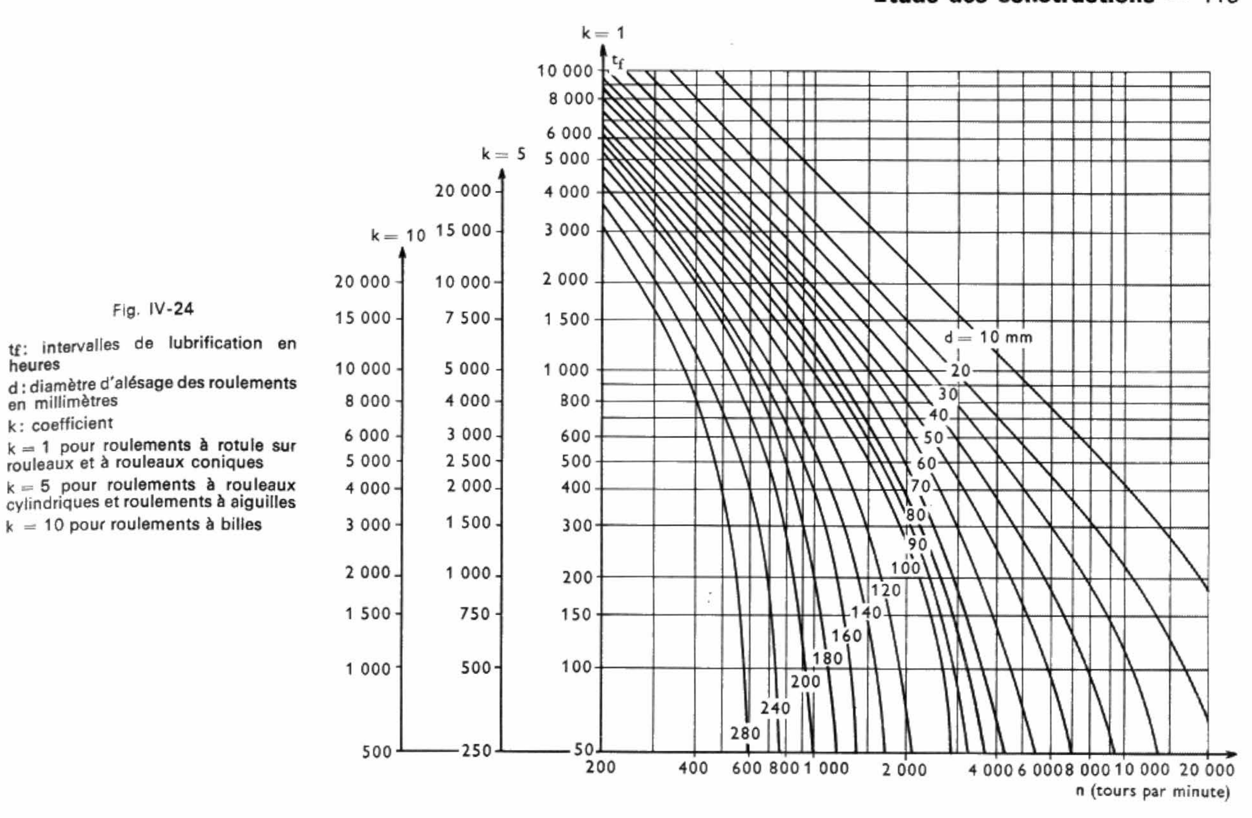


Fig. IV-24

t_f: intervalles de lubrification en heures
d : diamètre d'alésage des roulements en millimètres
k : coefficient
k = 1 pour roulements à rotule sur rouleaux et à rouleaux coniques
k = 5 pour roulements à rouleaux cylindriques et roulements à aiguilles
k = 10 pour roulements à billes

rature, sous réserve de ne pas dépasser la température maximale d'utilisation de la graisse.

Si la graisse a un rôle de protection contre la rouille, les intervalles de lubrification doivent aussi être beaucoup plus courts : les roulements de machines à papier soumises à des projections d'eau sont lubrifiés chaque semaine.

La détermination des intervalles de lubrification (fig. IV-24) et de la quantité de graisse à introduire permet de préciser les dispositions à prévoir dans le palier pour assurer une lubrification facile et efficace des roulements (roulements lubrifiés une ou deux fois par an : démontage du chapeau ou d'un couvercle latéral du palier ; appoints fréquents ; raccord de graissage pour introduction du lubrifiant au moyen d'une pompe).

Au montage, le roulement ne doit pas être complètement rempli de graisse car il en résulterait une forte élévation de température qui risquerait de détériorer le lubrifiant et, après quelques appoints, il faut enlever la graisse usagée. Cette précaution ne s'applique pas aux faibles vitesses.

4.1.2. Lubrification à l'huile. — La température de fonctionnement d'un roulement est optimale lorsque ce roulement reçoit une quantité relativement faible de lubrifiant. Avec la lubrification à l'huile, rendue nécessaire par les vitesses élevées, il faut donc éviter qu'il y ait trop de lubrifiant à l'intérieur du roulement pendant la marche.

Pour un bain d'huile ordinaire, le niveau doit être aussi bas que possible, c'est-à-dire un peu au-dessous du centre de l'élément roulant placé le plus bas. Aux vitesses très élevées, on obtient un meilleur résultat si l'huile est distribuée au roulement par une bague de graissage. Un renouvellement annuel de l'huile est normalement suffisant si la température est inférieure à 50 °C. Pour les roulements neufs, il est bon de faire le premier renouvellement après 500 heures de marche. Dans des conditions plus sévères, la fréquence de renouvellement doit être supérieure, par exemple, tous les deux ou trois mois, si la température est de 100 °C.

L'utilisation d'un brouillard d'huile, fourni par un pulvérisateur traversé par un courant d'air comprimé, permet de résoudre un grand nombre de problèmes de lubrification : le brouillard est introduit dans le palier et l'air s'échappant par les dispositifs d'obturation s'oppose à la pénétration des poussières dans le palier.

La durée des roulements est augmentée souvent dans une proportion justifiant à elle seule l'adoption de ce procédé. Le brouillard dépose dans le palier un mince film d'huile propre à assurer la lubrification. Si le montage est conçu de sorte que l'huile ne puisse s'accumuler dans le roulement, on réalise alors les conditions idéales de lubrification à vitesse élevée car les éléments roulants n'ont pas à chasser le lubrifiant superflu.

4.2. Lubrifiants

4.2.1. Graisses. — Il existe un grand nombre de graisses de haute qualité convenant à la lubrification des roulements. La plupart sont composées d'huile minérale épaissie par un savon métallique qui joue un grand rôle dans leurs propriétés. Le choix d'une graisse dépend de la température de fonctionnement, de sa capacité obturatrice et de son comportement sous l'action de l'humidité. Le point de goutte de la graisse doit être situé bien au-dessus de la température de fonctionnement la plus élevée. Les constructeurs indiquent les caractéristiques des graisses qu'il est conseillé d'utiliser suivant les températures de service.

4.2.2. Huiles. — Seule une huile minérale raffinée convient à la lubrification des roulements. Aux vitesses élevées, la viscosité de l'huile est d'une grande importance car le dégagement de chaleur dans le roulement augmente avec la viscosité et il convient d'employer une huile dont la viscosité, à la température de fonctionnement, n'est pas supérieure à celle qui assure une bonne lubrification. Le tableau ci-après indique, en fonction de la température d'utilisation, la valeur de la viscosité de l'huile à utiliser.

Température de fonctionnement (degrés Celsius)	Viscosité à 50 °C	
	(centistokes)	(degrés Engler)
30	7	1,55
40	8,5	1,7
50	12	2
60	17	2,5
70	25	3,5
80	35	4,7
90	50	6,6
100	70	9,2

5. ÉTANCHÉITÉ

Il est essentiel que le roulement fonctionne sans risque de pénétration de matières étrangères car celles-ci provoqueraient une usure rapide par rodage. Il faut également éviter que le lubrifiant ne s'échappe à l'extérieur du palier. Les dispositifs utilisés sont de deux types.

5.1. Dispositifs à frottement. — Ce sont les feutres et les joints synthétiques du commerce. L'inconvénient majeur est la limitation de la vitesse. On obtient une assez bonne étanchéité pour la graisse mais le résultat est souvent moins bon, surtout avec les feutres, lorsqu'il s'agit de s'opposer à la pénétration de poussières abrasives dans le palier. Enfin, l'arbre est usé par ce frottement continuel.

5.2. Dispositifs sans frottement. — Ce sont les chicanes ou labyrinthes (fig. IV-25). Au montage il ne faut pas omettre de les garnir de graisse qui forme étanchéité. Lorsque la lubrification du roulement est faite à l'huile, il faut prévoir, en outre, des rainures sur l'arbre et des larmiers dans le couvercle de palier pour éviter le ruissellement de l'huile vers l'extérieur. La grande variété de ces systèmes permet de résoudre pratiquement tous les problèmes d'étanchéité, même les plus compliqués. Il existe aussi des rondelles en tôle qui, disposées par paires en nombre suffisant, réalisent de bons labyrinthes (fig. IV-26).

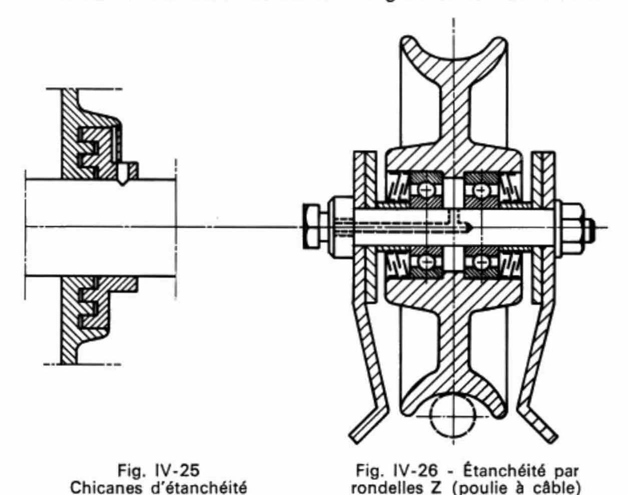


Fig. IV-25
Chicanes d'étanchéité

Fig. IV-26 - Étanchéité par rondelles Z (poulie à câble)

Dans certains cas, on peut adopter des roulements avec joints ou flasques de protection. Il est préférable de se renseigner auprès des fabricants pour déterminer s'il est possible d'adopter cette solution.

6. SURVEILLANCE ET ENTRETIEN

Dans la plupart des cas, la surveillance et l'entretien d'un roulement sont très réduits. Il suffit de contrôler régulièrement le bon fonctionnement, en observant le bruit et la température, et d'effectuer les appoints de lubrification nécessaires.

Lorsque les machines viennent en révision, on peut en profiter pour examiner l'état des roulements (recherche des débuts d'écaillage éventuel sur chemins de roulement ou éléments roulants). Il convient alors de les démonter en observant les mêmes précautions qu'au montage.

7. EXEMPLES DE MONTAGE

Ces exemples proposés par S.K.F. (fig. IV-27 à IV-30), illustrent l'ensemble des considérations ci-dessus. Il est conseillé de consulter les services techniques des fabricants de roulements, notamment dans les cas délicats.

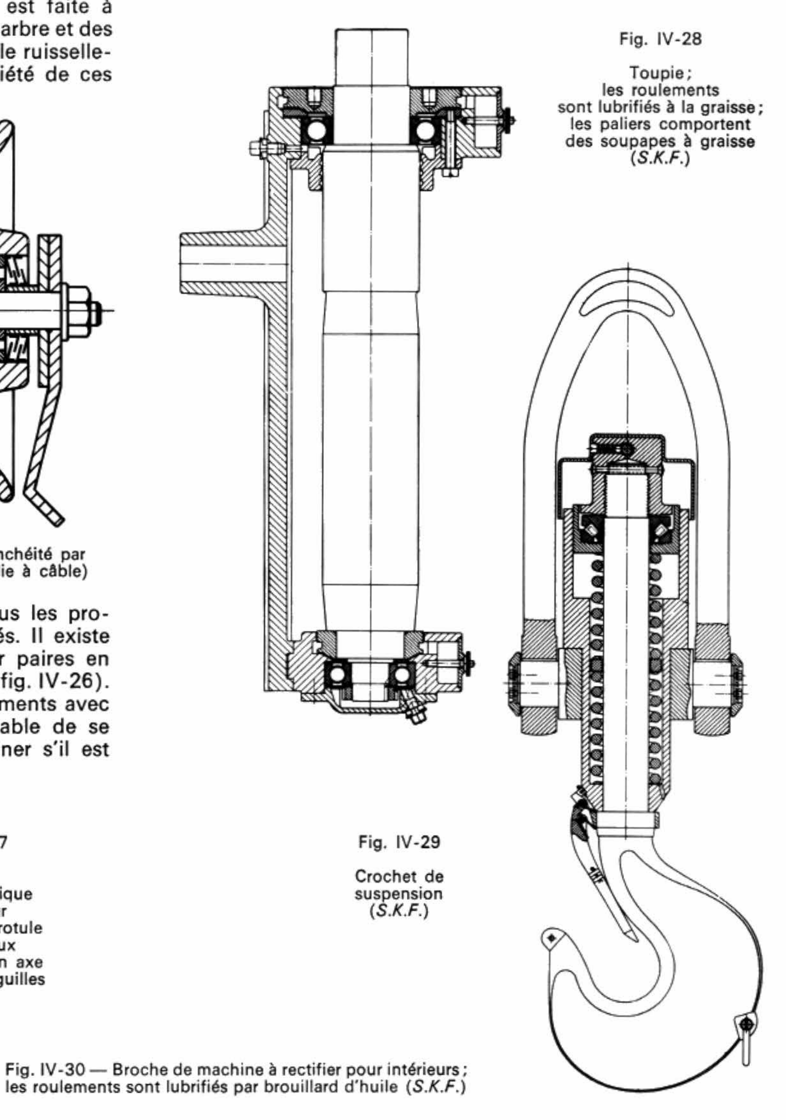


Fig. IV-28

Toupie ; les roulements sont lubrifiés à la graisse ; les paliers comportent des soupapes à graisse (*S.K.F.*)

Fig. IV-29

Crochet de suspension (*S.K.F.*)

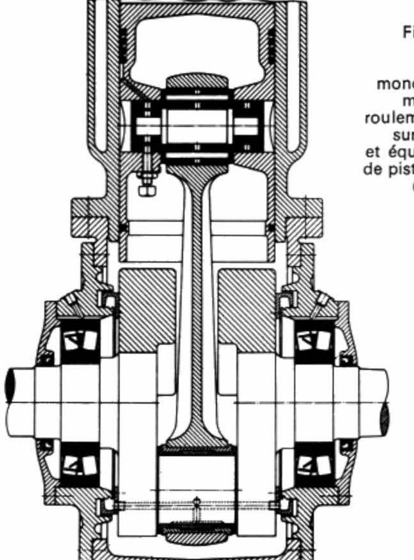


Fig. IV-27

Moteur monocylindrique monté sur roulements à rotule sur rouleaux et équipé d'un axe de piston à aiguilles (*S.K.F.*)

Fig. IV-30 — Broche de machine à rectifier pour intérieurs ; les roulements sont lubrifiés par brouillard d'huile (*S.K.F.*)

CHAPITRE V
TRANSMISSION DU MOUVEMENT CIRCULAIRE

1. ARBRES

1.1. Généralités

1.1.1. Arbres moteurs. — Ils constituent l'organe essentiel des machines motrices ou moteurs dont le mouvement principal est un mouvement de rotation (arbre de moteur électrique ou de turbine). Les moteurs à mouvement alternatif, comme les moteurs à explosion, possèdent un arbre de forme spéciale, appelé *vilebrequin ;* composé de manivelles, il permet de transformer le mouvement rectiligne alternatif des pistons en un mouvement circulaire uniforme, par l'intermédiaire des bielles.

1.1.2. Arbres de transmission. — Ce sont des organes intermédiaires : recevant l'énergie mécanique d'un moteur, ils la transmettent à une machine réceptrice (par l'intermédiaire d'organes de transmission : accouplements, embrayages, boîtes de vitesses, variateurs) et ils peuvent porter poulies, engrenages, roues de friction, etc.

1.1.3. Arbres récepteurs. — Constituant l'organe principal des machines réceptrices (machines-outils, compresseurs, pompes, etc.), ils reçoivent l'énergie mécanique, soit directement du moteur, soit par l'intermédiaire des arbres de transmission et transmettent cette énergie aux organes récepteurs (rotor d'une pompe ou outils d'une machine).

1.2. Calcul des arbres. — Les arbres doivent être calculés pour remplir un certain nombre de conditions :

— Résistance mécanique : en aucun point la contrainte ne doit dépasser la résistance pratique du métal.

— Rigidité à la torsion ou à la flexion : elle doit être telle que les déformations élastiques, dues aux charges appliquées, restent inférieures aux déformations maximales admissibles sous peine d'engendrer des vibrations et un guidage défectueux.

— Tourillons (parties des arbres assurant leur guidage dans les paliers) : ils doivent être prévus en tenant compte des conditions de fonctionnement (V. § 1.3).

— Équilibrage en rotation (statique et dynamique) : lorsque les arbres tournent rapidement, l'équilibrage doit être réalisé par usinage ou par adjonction de masselottes, faute de quoi la force d'inertie centrifuge détermine des contraintes et des déformations nuisibles ou dangereuses à certaines vitesses dites « vitesses critiques ».

1.2.1. Arbre court. — *Exemple :* arbre de moteur électrique. Si les charges transversales donnent un moment fléchissant faible, on calcule l'arbre à la résistance à la torsion (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 6). D'où, le diamètre en millimètres :

$$d \geqslant \sqrt[3]{\frac{\mathcal{M}_t}{0{,}2\,R_{pg}}}$$

avec : $\mathcal{M}_t$, moment de torsion (en décanewtons-millimètres) et R_{pg}, résistance pratique au cisaillement (en décanewtons par millimètre carré). Si les données sont la puissance transmise P (en watts) et la vitesse de rotation ω (en radians par seconde), on a : $\mathcal{M}_t . \omega = 10\,P$.

Remarque : Le coefficient de sécurité qui détermine R_{pg} est choisi selon les particularités de fonctionnement (importance de l'inertie des organes entraînés et des brusques variations de charge).

1.2.2. Arbre long. — *Exemple :* arbre de transmission avec poulies ou engrenages placés près des paliers (fig. V-1). Dans ce cas, une variation brusque de la charge peut provoquer une rotation relative importante des sections extrêmes et l'arbre risque de se comporter comme un ressort. On impose alors une limite à l'angle de torsion unitaire,

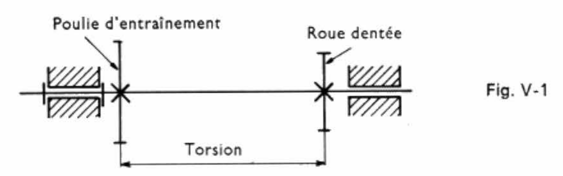


Fig. V-1

généralement un degré par mètre de longueur (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 6). D'où le diamètre (en millimètres) :

$$d \geqslant \sqrt[4]{\frac{\mathcal{M}_t}{0{,}1\,G}}$$

avec : G, module d'élasticité transversale (en décanewtons par millimètre carré).

1.2.3. Calcul à la flexion. — *Exemple :* arbre de grande longueur fortement chargé transversalement et transmettant un faible couple (fig. V-2). Si le moment de torsion est faible par rapport au moment de flexion, on peut faire le calcul à la flexion des sections les plus chargées (sections dangereuses) et contrôler que la flèche est inférieure à 0,5 mm par mètre entre paliers (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 5 et 7).

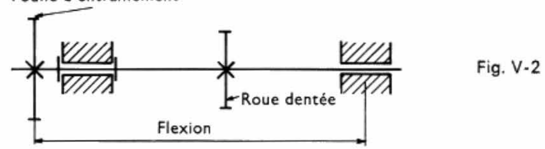


Fig. V-2

1.2.4. Cas général. — On utilise le moment idéal de flexion (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 7 § 4). D'où :

$$d \geqslant \sqrt[3]{\frac{\mathcal{M}_i}{0{,}1\,R_{pt}}}$$

avec : R_{pt}, résistance pratique à l'extension.

On utilise aussi, pour les avant-projets, la formule approchée :

$$d = 130\sqrt[4]{\frac{P}{n}}$$

avec : P, puissance transmise (en kilowatts) et n, fréquence de rotation (en tours par minute).

1.2.5. Arbres creux. — Pour une même résistance, ils ont l'avantage de réduire beaucoup le poids de l'arbre moyennant une légère augmentation du diamètre (arbre de turbine). De plus, leur alésage peut être utilisé comme passage (broches de machines-outils, commande d'embrayage).

Calculés à la résistance à la torsion, leur diamètre extérieur d_e se détermine en partant du diamètre d de l'arbre plein correspondant (V. § 1.2.1) par la formule :

$$d_e = \frac{d}{\sqrt[3]{1 - m^4}}$$

avec : m, rapport du diamètre intérieur et du diamètre extérieur (en général, compris entre 0,6 et 0,8).

Dans les autres cas, il faut calculer leur moment quadratique polaire (V. § 1.2.2) ou leur module de flexion (V. § 1.2.3 et 1.2.4).

1.3. Calcul des tourillons et des pivots. — On appelle tourillons la partie des arbres en contact avec les paliers. Ils sont généralement cylindriques et leur calcul doit tenir compte de leur résistance mécanique, du graissage et de l'échauffement dû aux frottements.

1.3.1. Tourillons porteurs. — Ce sont ceux qui supportent principalement des efforts radiaux. Ils sont limités de part et d'autre par des collets assurant le positionnement longitudinal (fig. V-3). Le raccordement entre la partie frottante et les collets s'effectue par des rayons importants pour éviter les risques de rupture par effet d'entaille dû aux angles vifs. Le diamètre de l'arbre peut être celui du tourillon ou celui du collet.

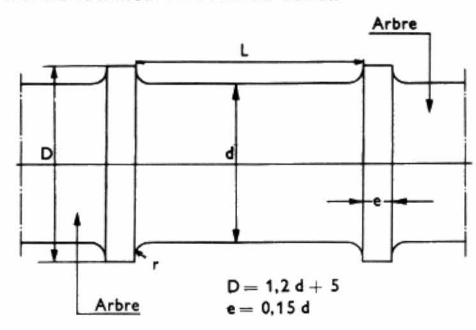


Fig. V-3 — Tourillon intermédiaire

1° *Calcul en fonction de la pression diamétrale.* — Le tourillon étant défini par son diamètre d (en millimètres) et sa longueur L (en millimètres), la pression diamétrale p (en décanewtons par millimètre carré) est déterminée par :

$$p = \frac{P}{L \cdot d}$$

avec : P (en décanewtons), charge sur le palier (fonction de la charge radiale de l'arbre).

En pratique, on adopte : $L = kd$, avec :

$k = 1$, pour une vitesse inférieure à 100 tr/mn et palier rigide,
$k = 1{,}5$, pour une vitesse proche de 150 tr/mn et palier rigide,
$k = 1{,}5$ pour une vitesse voisine de 300 tr/mn et palier articulé,
$k = 2$ à 3, pour une vitesse plus élevée et palier à rotule.

On admet généralement les valeurs suivantes pour p :

$p = 1{,}5$, pour paliers de moteurs à explosions avec graissage sous pression,
$p = 0{,}9$ pour tourillons d'acier trempé sur bronze avec graissage sous pression,
$p = 0{,}6$, pour tourillons d'acier sur bronze avec graissage continu et vitesse elevée,
$p = 0{,}3$, pour tourillons d'acier sur antifriction avec graissage continu,
$p = 0{,}15$, pour tourillons d'acier sur bronze avec graissage intermittent (régime onctueux),
$p = 0{,}10$, pour tourillons d'acier sur fonte avec graissage onctueux.

D'où la valeur de d :

$$d \geqslant \sqrt{\frac{P}{kp}}$$

2° *Calcul en fonction de la résistance mécanique.* — Un tourillon d'extrémité peut être considéré comme une poutre encastrée à une extrémité et soumise à une charge uniformément répartie due à la pression diamétrale. D'où :

$$d \geqslant \sqrt[3]{\frac{P\,L}{0{,}2\,R_{pt}}}$$

avec : R_{pt} résistance pratique du métal à l'extension (en décanewtons par millimètre carré).

Un tourillon intermédiaire, avec l'arbre de part et d'autre, se calcule comme l'arbre lui-même dont il constitue la section sur un appui (flexion, et torsion ou torsion seule ; V. § 1.2).

3° *Vérification des conditions d'échauffement.* — Le travail de frottement du tourillon sur le coussinet se transforme en chaleur qui doit être évacuée si l'on veut éviter l'échauffement du palier, la décomposition du lubrifiant et le grippage (pour que le graissage soit efficace, il faut que la température reste inférieure à 60 °C). La détermination exacte des échanges de chaleur étant difficile, on se base sur le produit caractéristique pv, p étant la pression diamétrale de l'arbre sur le coussinet, (en décanewtons par millimètre carré) et v la vitesse périphérique du tourillon (mètres par seconde). La pratique a permis de fixer les valeurs acceptables de pv suivant l'utilisation des paliers :

$pv = 0{,}1$ à 0,2 pour refroidissement quelconque et graissage ordinaire (paliers de transmission) ;
$pv = 0{,}3$ à 0,4 pour refroidissement assez important et graissage continu ;
$pv = 0{,}88$ à 0,93 pour paliers à circulation d'huile sous pression ;
$pv = 1{,}08$ pour paliers refroidis par circulation d'eau.

1.3.2. Pivots. — Les pivots (fig. V-4) supportent essentiellement une poussée axiale et sont toujours placés à l'extrémité inférieure d'un arbre vertical. Toute la charge

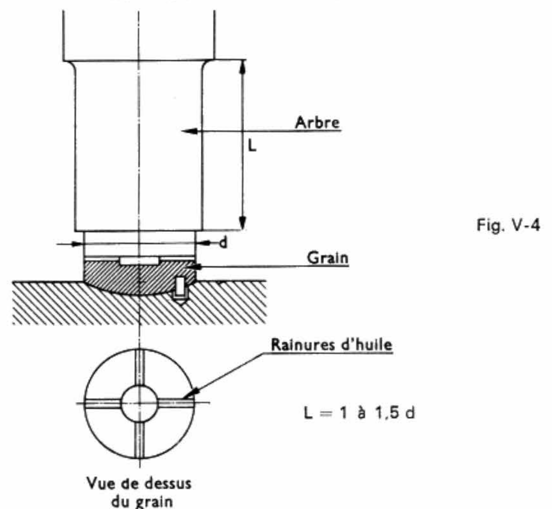


Fig. V-4

porte sur la surface d'extrémité de l'arbre, généralement cémentée et trempée qui, elle-même, repose sur une pièce appelée *grain*, en acier traité ou en bronze. Ce grain fait partie d'un ensemble, appelé *crapaudine*. Les surfaces du pivot et du grain portent des rainures formant réservoir afin d'assurer un bon graissage.

La pression p du pivot sur le grain et le produit pv seront inférieurs à la fraction $\frac{3}{5}$ des valeurs utilisées pour calculer les tourillons en raison de plus mauvaises conditions de refroidissement.

1.4. Construction des arbres

1.4.1. Diamètres et vitesses de rotation. — Les diamètres des arbres de transmission sont normalisés (norme NF E 22-100) et égaux à (en millimètres) :
20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120 et 150.

Leurs fréquences de rotation le sont aussi (norme NF E 22-003) et ont les valeurs suivantes (en tours par minute) :

25	63	160	400	1 000	2 500
31,5	80	200	500	1 250	3 150
40	100	250	630	1 600	
50	125	315	800	2 000	

On adopte généralement :

Ateliers de petit usinage	100 à 315 tr/mn
Ateliers de gros usinage	100 à 250 tr/mn
Ateliers de menuiserie	400 à 630 tr/mn
Filatures	250 à 400 tr/mn

1.4.2. Matériaux utilisés

1° *Aciers non alliés.* — Les aciers doux étirés (R = 40 à 50 daN/mm²) sont employés sans usinage, grâce à leurs faibles tolérances, pour les arbres de transmission ; les aciers mi-durs et durs, souvent trempés (R = 55 à 80 daN/mm²) sont utilisés, usinés ou forgés, pour les arbres incorporés aux machines.

2° *Fontes ductiles à graphite sphéroïdal.* — Alliées ou non (R = 65 à 100 daN/mm²), elles permettent

l'obtention économique d'arbres de formes complexes (vilebrequins creux à contrepoids incorporés de moteur d'automobile obtenus par fonderie).

3° *Aciers alliés.* — Au chrome ou au nickel-chrome trempés et revenus ($R \geqslant 120$ daN/mm²) ; ils sont réservés pour les fortes charges.

1.4.3. Détails de forme

1° *Arbres de transmission.* — Ils sont généralement lisses et leur déplacement axial est limité par des bagues d'arrêt (fig. V-5) placées de chaque côté du coussinet (à l'intérieur du palier de façon à assurer un graissage correct de la bague sur la joue du coussinet). Pour de faibles poussées axiales, les bagues sont fixées à l'aide de vis sans tête à bout pointu ou exécutées en deux pièces (cette dernière disposition est utilisée pour $d \geqslant 40$ mm). Pour de fortes poussées, les bagues sont montées à chaud.

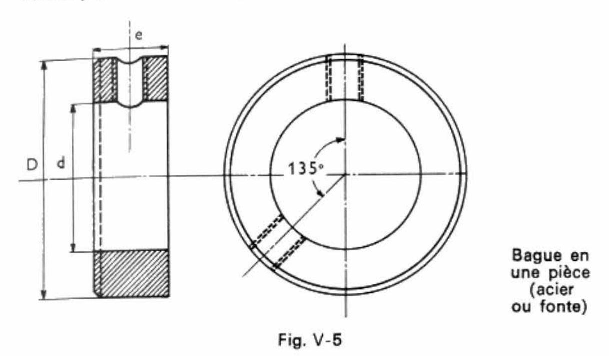
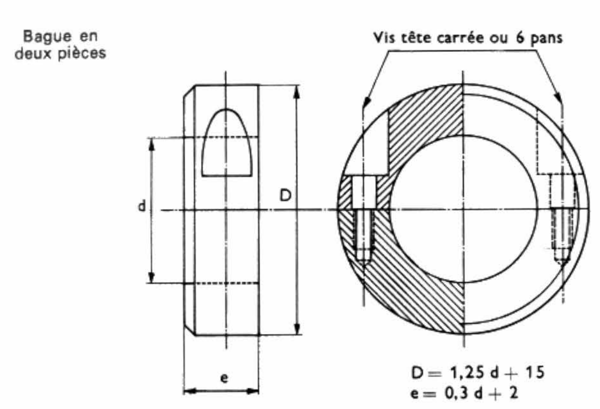


Fig. V-5



2° *Arbres incorporés aux machines.* — Ces arbres courts comportent, en raison de leurs liaisons avec les organes de transmission, des formes telles que rainures de clavette, parties cannelées et épaulements dont l'usinage doit éviter les angles vifs à cause des concentrations de contraintes correspondantes (fig. V-6).

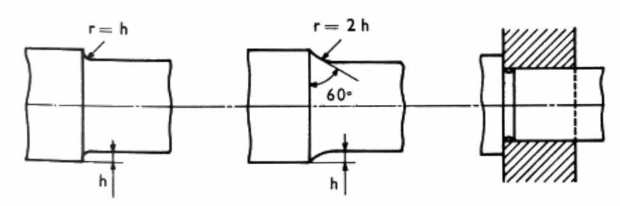


Fig. V-6 — Exemples de raccordements

3° *Bouts d'arbre.* — Cylindriques ou coniques, ils sont normalisés (fig. V-7).

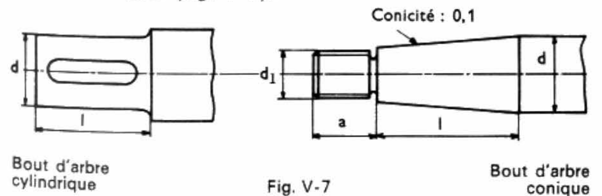


Fig. V-7

2. ACCOUPLEMENTS

Utilisés lorsque deux arbres placés dans le prolongement l'un de l'autre doivent être rendus solidaires, ces organes constituent une liaison rigide complète ou simplement une liaison en rotation, permanente ou temporaire, entre les deux arbres.

Les différents types de manchons rigides utilisés pour réaliser des lignes d'arbre de grande longueur voient leur importance diminuer par suite de la commande individuelle des machines par moteurs électriques. En revanche, l'emploi de manchons élastiques et d'embrayages devient de plus en plus fréquent pour accoupler une machine réceptrice avec son moteur.

2.1. Accouplements permanents

2.1.1. Accouplements rigides. — Nécessitant un alignement parfait, ils rendent les arbres solidaires axialement, radialement et en rotation.

1° *Manchons à coquilles frettées.* — Ils se composent de deux coquilles en fonte ou en acier biconiques extérieurement sur lesquelles on emmanche deux frettes en acier forgé assurant le blocage de l'arbre. La faible conicité (6 %) assure le coincement des frettes (fig. V-8). Toutes

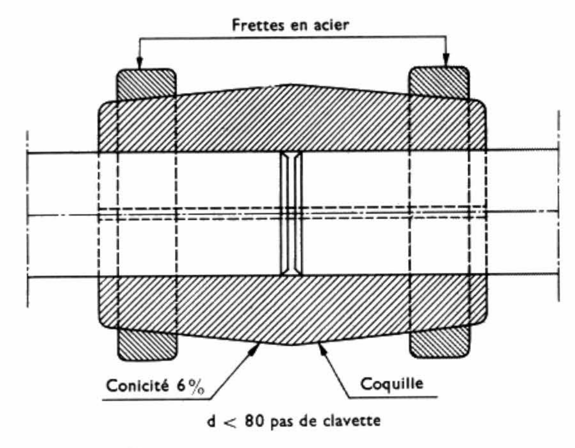


Fig. V-8 — Manchon à coquilles frettées

les pièces sont entièrement usinées assurant ainsi un bon équilibrage et permettant une fréquence de rotation maximale de 600 tr/mn. Pour les diamètres d'arbres inférieurs à 80 mm, le pincement des coquilles suffit pour assurer l'entraînement; mais, pour les diamètres plus grands il est recommandé d'utiliser un clavetage à clavettes parallèles. Le montage des frettes s'effectue à froid, soit au marteau, soit à l'aide de deux colliers rapprochés par des boulons.

2° *Manchons à coquilles boulonnées.* — Ils sont constitués par deux coquilles en fonte serrées par des boulons placés le plus près possible des arbres et dont les têtes et les écrous sont noyés dans des cavités venues de fonderies (fig. V-9). Ces manchons sont très faciles à

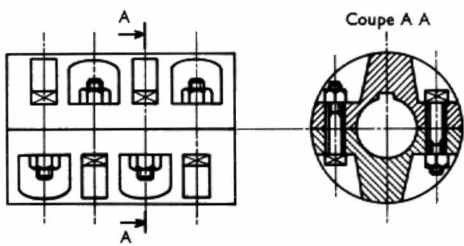


Fig. V-9 — Manchon à coquilles boulonnées

monter et d'un prix peu élevé mais, par suite des parties restant brutes de fonderie, leur équilibrage est médiocre et on ne les utilise pas au-dessus de 300 tr/mn. Comme pour les précédents, un clavetage à clavettes parallèles est nécessaire si d dépasse 80 mm.

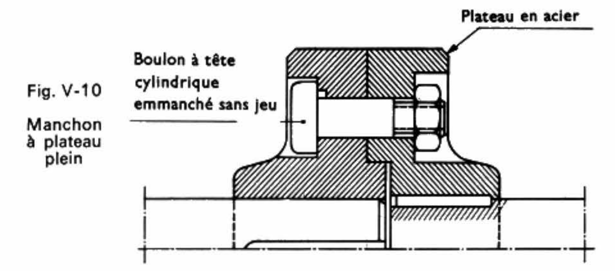


Fig. V-10 Manchon à plateau plein

3° *Manchons à plateaux.* — C'est le meilleur dispositif de liaison rigide. Il est constitué par deux plateaux emmanchés à force sur les arbres à accoupler. Au montage, le centrage des arbres est obtenu par emboîtement des deux plateaux et la liaison est assurée par des boulons montés sans jeu dans leurs logements. Ce dispositif est complété par un clavetage pour les puissances importantes. Pour des vitesses inférieures à 350 tr/mn, on utilise des plateaux évidés en fonte dont seules les faces de contact sont usinées. Aux vitesses supérieures, on adopte des plateaux pleins en acier usinés partout (fig. V-10) donc parfaitement équilibrés et utilisables jusqu'à 2 000 tr/mn.

2.1.2. Accouplements élastiques. — Systématiquement utilisés pour l'accouplement de deux machines motrice et réceptrice, ils ne nécessitent pas un alignement rigoureux des arbres et permettent une légère variation des vitesses angulaires, assurant ainsi un démarrage progressif pendant un temps très court, diminuant d'autant les forces d'inertie et amortissant les vibrations de torsion. La partie élastique est constituée par des éléments de caoutchouc adhérant à des pièces métalliques solidaires de chacun des arbres ou par des ressorts. Les caractéristiques données par les catalogues (couple, vitesse et déformations admissibles) permettent de sélectionner le modèle le mieux adapté; l'utilisateur a cependant intérêt à consulter les services techniques du constructeur avant un choix définitif.

1° *Accouplement « Miniflex »* (*Paulstra*). — Spécialement conçu pour les transmissions de faible puissance, il se monte et se démonte par simple emboîtement (fig. V-11).

2° *Accouplement « Juboflex »* (*Paulstra*). — Cet accouplement, de grande souplesse et de grande résistance à la fatigue, a de très nombreuses applications. Il est possible de monter et démonter l'élément élastique sans déplacer les arbres (fig. V-12).

3° *Accouplement « Radiaflex R »* (*Paulstra*). — Comportant une couronne de plots élastiques, conçu pour les transmissions à vitesse moyenne et forte puissance, il s'accommode d'un alignement rudimentaire des arbres. (V. fig. II-8).

4° *Accouplement « Pneumabloc »* (*Éts Colmant et Cuvelier*). — Composé essentiellement de deux plateaux en acier reliés par un élément flexible (en vulkollan) de forme torique, il convient aux grandes vitesses (fig. V-13).

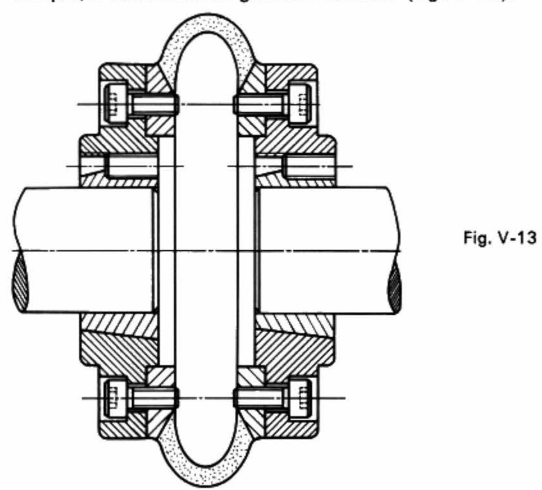


Fig. V-13

5° *Accouplement à ressort en « zigzag ».* — Une lame de ressort est montée en « zigzag » dans les rainures des manchons; un boîtier maintient le ressort et la graisse consistante, mise au montage, et évite les effets de la force centrifuge. Cet accouplement convient aux grandes vitesses et aux grandes puissances (fig. V-14).

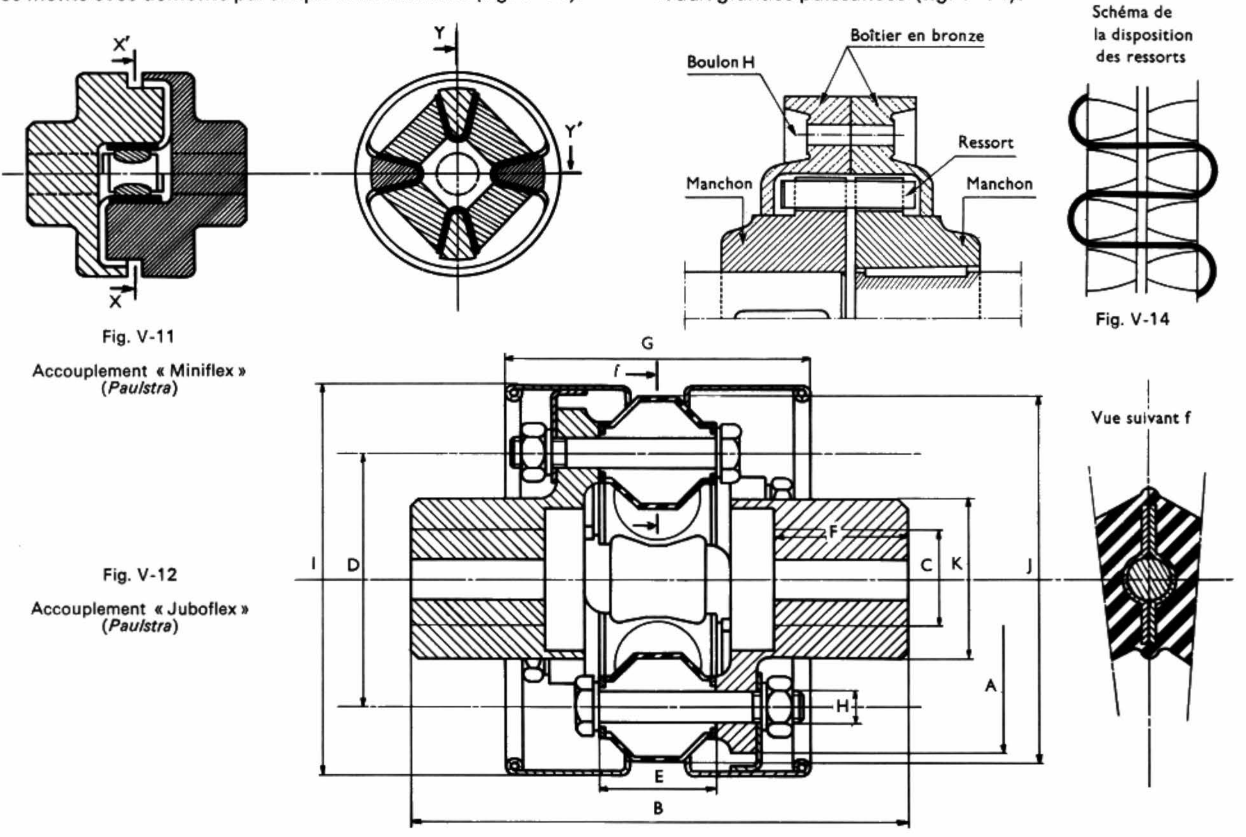


Fig. V-11 Accouplement « Miniflex » (*Paulstra*)

Fig. V-14

Fig. V-12 Accouplement « Juboflex » (*Paulstra*)

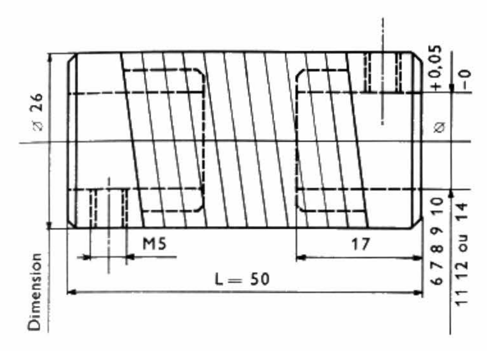


Fig. V-15 — Accouplement « Simplaflex »

6° *Accouplement « Simplaflex »* (*Éts Lebel Simplabelt*). — Composé d'un ressort hélicoïdal et de deux manchons en zamak coulé sous pression, il a un faible encombrement (fig. V-15).

2.1.3. Accouplements mobiles. — Assurant un entraînement continu, ils permettent un déplacement relatif des arbres, axial ou angulaire.

1° *Joint de dilatation.* — Il permet uniquement un déplacement axial; composé de deux manchons à griffes calés sur les arbres et centrés par une bague en bronze, il compense les variations de longueurs dues aux dilatations (fig. V-16).

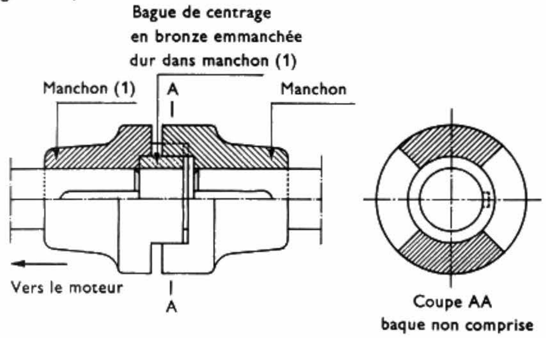


Fig. V-16 — Joint de dilatation

2° *Cannelures.* — Un arbre cannelé coulisse avec jeu dans un moyeu dont les rainures sont complémentaires; chaque cannelure joue le rôle d'une clavette coulissante et le couple transmissible est élevé. Dans certains dispositifs, l'arbre a la forme d'une noix cannelée et un déplacement angulaire des arbres est également possible.

3° *Joint de cardan.* — Pour accoupler deux transmissions concourantes en un point fixe et se coupant sous un angle α, on utilise un joint articulé appelé joint de cardan. Composé de deux fourches solidaires des arbres et reliées par un croisillon portant des tourillons disposés à 90° (fig. V-17), il permet une variation de α pendant la rotation mais les vitesses angulaires instantanées des deux arbres sont différentes et il donne une rotation irrégulière de l'arbre récepteur, d'où des vibrations.

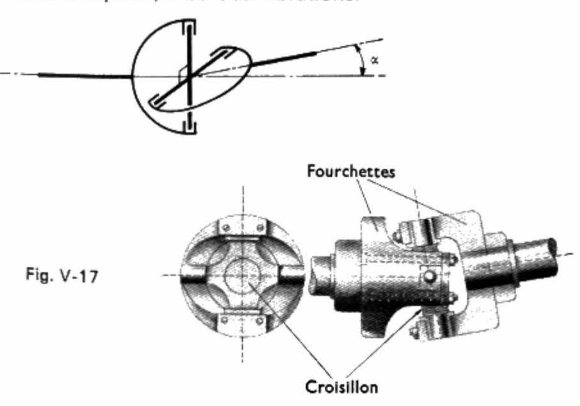


Fig. V-17

Pour y remédier (et également pour $\alpha \geqslant 30°$), on utilise un double joint de cardan où les deux arbres sont reliés par un arbre intermédiaire comportant un cardan à chaque extrémité : on obtient un rapport constant des vitesses angulaires des arbres moteur et récepteur si l'arbre intermédiaire fait le même angle avec chacun des deux arbres et si ses fourches sont dans un même plan.

L'ensemble du double joint de cardan ainsi réalisé est appelé joint *homocinétique*. Souvent, la distance entre les arbres varie et le joint comporte un arbre intermédiaire coulissant sur cannelures. Ces joints servent pour la commande des avances de table de fraiseuses, pour l'entraînement des broches de perceuses multiples et pour toutes les transmissions, fréquentes en construction automobile, où les arbres ont des déplacements angulaires.

2.1.4. Accouplements de sécurité. — Assurant normalement un entraînement permanent, ce type d'accouplement permet la rotation de l'un des arbres si l'autre se bloque : le dispositif à friction du manchon de sécurité (fig. V-18) ou du moyeu « Roba » (fig. V-19, pièce entraînée non représentée) est réglable à l'arrêt et limite le couple transmissible, évitant les surcharges de la transmission dans les machines à couple résistant brusquement variable (broyeurs).

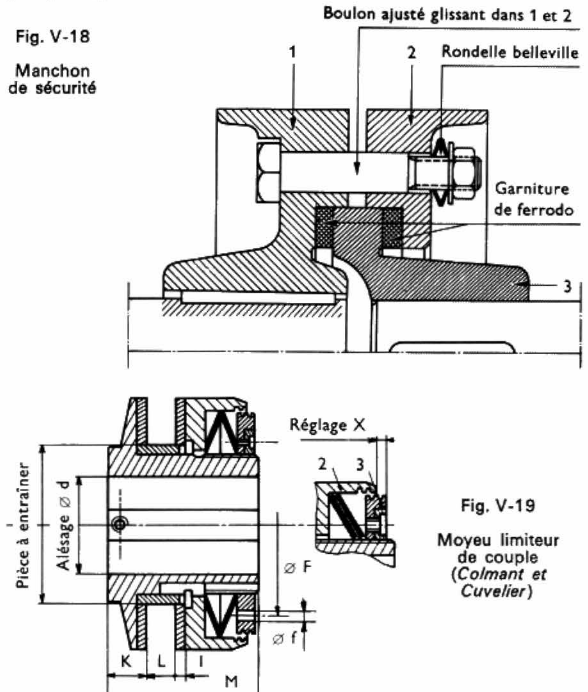


Fig. V-18 Manchon de sécurité

Fig. V-19 Moyeu limiteur de couple (*Colmant et Cuvelier*)

2.2. Accouplements temporaires manœuvrables à l'arrêt. — Le manchon à griffes (fig. V-20) dérive du joint de dilatation : son manchon récepteur est coulissant et permet d'accoupler ou non les arbres dont le centrage doit être assuré par des paliers. Son principe, adopté dans les boîtes de vitesses, exclut la manœuvre en marche (machines-outils) ou exige des dispositifs amenant les deux arbres à des vitesses voisines (automobile).

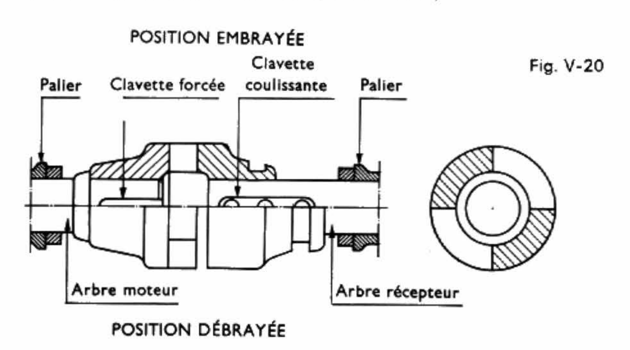


Fig. V-20

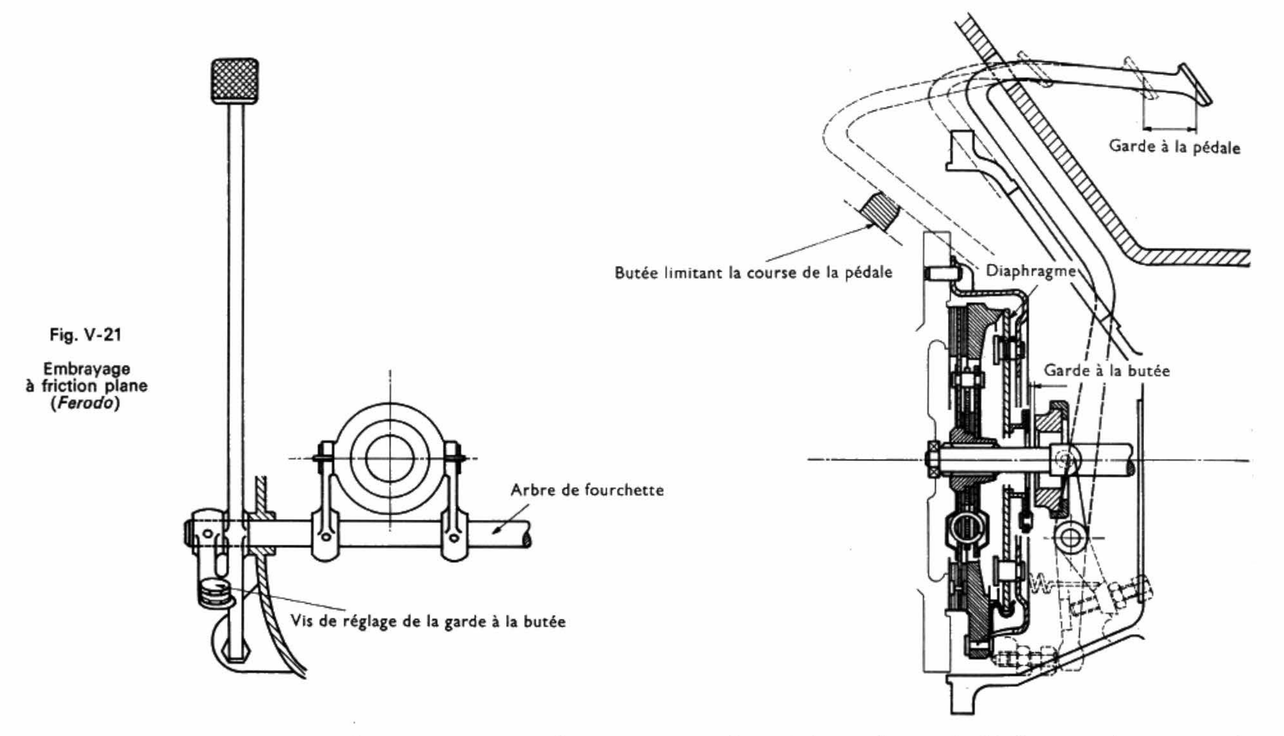


Fig. V-21
Embrayage à friction plane (*Ferodo*)

2.3. Embrayages (accouplements temporaires manœuvrables en marche). — Perfectionnement des précédents, ils permettent la manœuvre sans arrêt de l'arbre moteur, leur conception assurant un entraînement progressif de l'arbre récepteur jusqu'à la vitesse de l'arbre moteur; ensuite, ils se comportent comme des accouplements de sécurité réglables en marche et ils peuvent être débrayés sauf s'il s'agit de coupleurs.

On les classe suivant leur conception (mécanique ou hydraulique), leur fonctionnement (commande ou automatique) et leur mode de commande.

2.3.1. Embrayages à entraînement mécanique. — Leur conception repose sur des phénomènes de frottement : des surfaces solidaires de chacun des arbres sont appliquées l'une sur l'autre par une force qui détermine le couple transmissible. L'une de ces surfaces peut être garnie d'un matériau de friction remplaçable dont l'usure préférentielle limite celle de la surface métallique opposée. La forme des surfaces est plane, conique ou cylindrique et le fonctionnement a lieu à sec ou dans l'huile.

1° *Embrayages mécaniques commandés.* — Ils permettent de réunir ou de séparer les deux arbres, à volonté. Des ressorts (hélicoïdaux ou à diaphragme) appliquent normalement les surfaces de friction que la commande sépare ; ou bien ces surfaces, normalement libres et séparées par les ressorts, sont plaquées par la commande.

— *Commande mécanique.* — L'embrayage monodisque (fig. V-21) ou bidisque, à friction plane à sec est le plus utilisé en construction automobile et pour les tracteurs et machines agricoles; sa commande doit agir pendant toute la durée du débrayage.

L'embrayage multidisque à friction plane est surtout employé en machines-outils: dans le modèle M.G.E. (fig. V-22) la commande enclenche ou déclenche le serrage des disques qui reste ensuite autoverrouillé par les billes dans la position choisie et cela sans action extérieure continue. Ce type d'appareil est très compact car le couple transmissible est proportionnel au nombre de disques; de plus, réalisé sous forme d'embrayage double, il permet d'embrayer avec la même commande l'un ou l'autre des blocs de disques (inversion de marche, par exemple). Fonctionnant dans l'huile, ce qui limite l'usure et assure le refroidissement quand la cadence de manœuvre est élevée, il ne doit pas baigner dans le lubrifiant mais être arrosé. Fonctionnant à sec, il exige des disques en matériaux spéciaux.

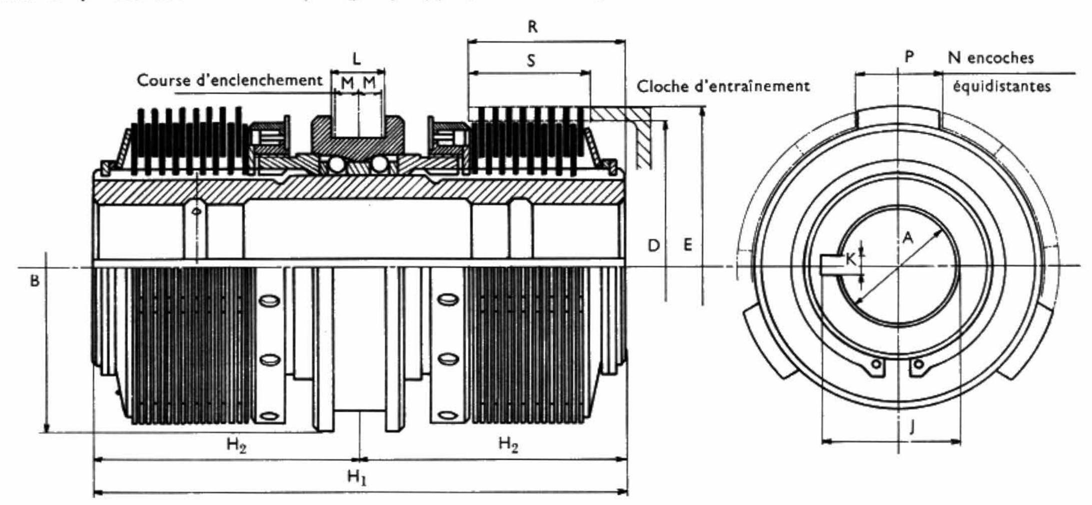


Fig. V-22 — Embrayage double à friction plane modèle M.G.E.

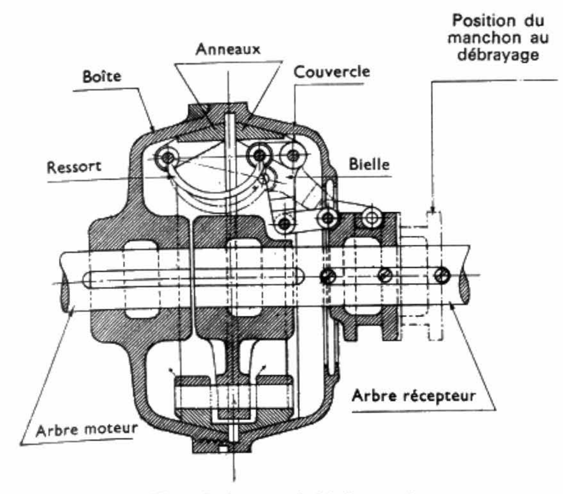


Fig. V-23 — Embrayage à friction conique

Dans l'embrayage à cônes (fig. V-23), les anneaux de frictions sont écartés et plaqués sur les cônes par des ressorts qui restent autoverrouillés en position embrayée : la commande n'agit que pendant les manœuvres.

— *Commande électromagnétique.* — Elle utilise la fermeture d'un circuit magnétique au travers des disques en acier d'un embrayage multidisque pour obtenir la pression entre ces disques lorsque la bobine de commande est sous tension. Ce circuit étant sans entrefer, le couple transmissible est indépendant de l'épaisseur des disques et de leur usure : il ne dépend que de la valeur du courant dans la bobine. La commande à distance de ces embrayages est facile : ils sont très employés pour la réalisation de transmissions automatiques ou d'asservissements, où les mécanismes sont fermés et lubrifiés (machines à calculer, machines-outils à cycle automatique ou à commande numérique, appareils de levage et engins de manutentions). Le type le plus simple (fig. V-24) comporte une bobine solidaire de

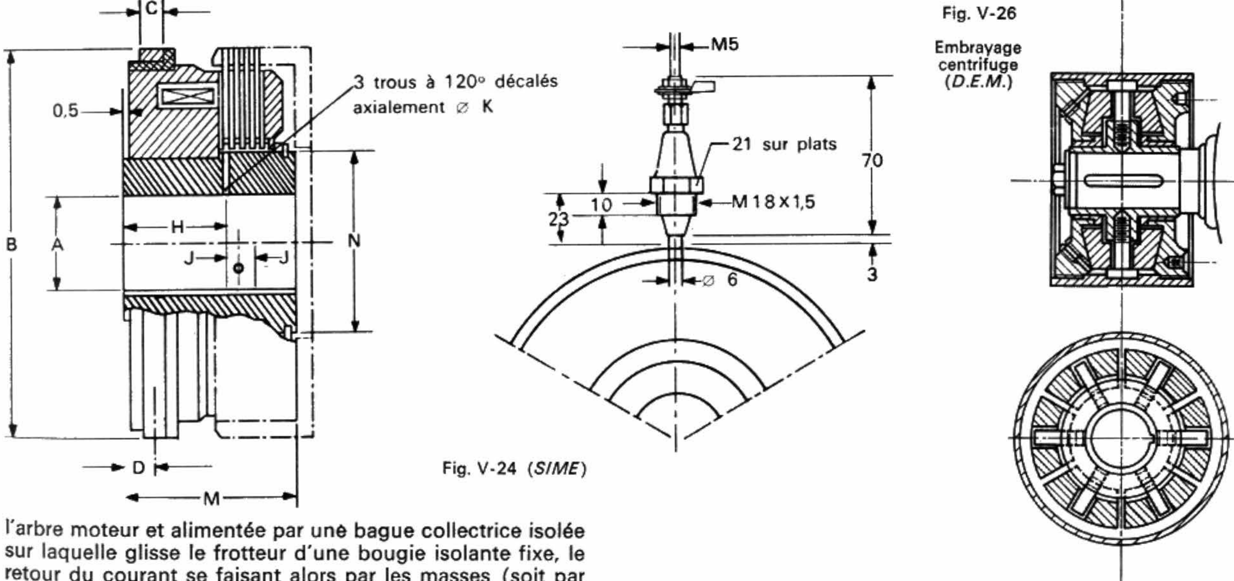


Fig. V-24 (*SIME*)

Fig. V-26 Embrayage centrifuge (*D.E.M.*)

l'arbre moteur et alimentée par une bague collectrice isolée sur laquelle glisse le frotteur d'une bougie isolante fixe, le retour du courant se faisant alors par les masses (soit par les roulements, soit par un frotteur prévu sur l'arbre). Pour des questions de sécurité, la tension utilisée est généralement limitée à 24 volts en courant continu : le raccordement à un circuit alternatif se fait par un transformateur-redresseur et les ouvertures ou fermetures de circuit se font sur le courant continu pour réduire le temps de réponse. Celui-ci est encore diminué à l'enclenchement en utilisant, pendant le temps d'établissement du flux magnétique, une tension supérieure à la tension de maintient et au déclenchement en inversant le sens du courant dans la bobine pendant le temps de démagnétisation.

— *Commande hydraulique ou pneumatique.* — Un piston annulaire actionne par de l'huile ou de l'air comprimé les disques d'un embrayage multidisque dont le couple transmissible est indépendant de l'usure des disques et proportionnel à la pression du fluide de commande. Cette pression doit être maintenue pendant toute la durée de l'embrayage. L'admission du fluide se fait par un collecteur fixe (fig. V-25) ; embrayage hydraulique simple) ou par l'arbre dont la canalisation est alimentée par un joint tournant (embrayage pneumatique).

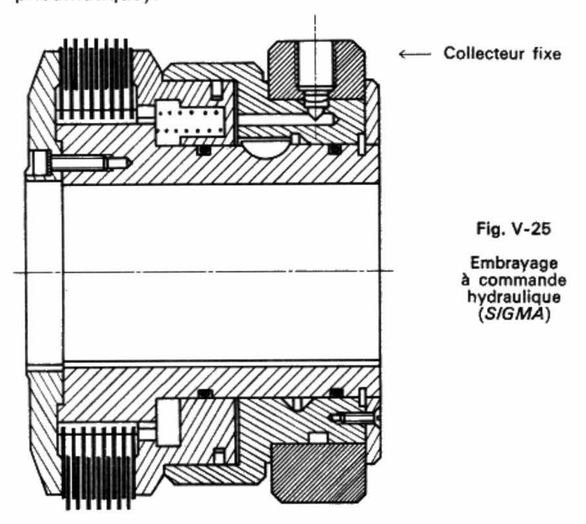


Fig. V-25 Embrayage à commande hydraulique (*SIGMA*)

2° *Embrayages mécaniques automatiques ou coupleurs mécaniques.* — Ils permettent d'entraîner l'arbre récepteur si l'arbre moteur atteint une vitesse de rotation suffisante. Des masses mobiles solidaires en rotation de l'arbre moteur s'appliquent sur les parois de la cloche réceptrice sous l'effet de la force centrifuge. Dans les systèmes fonctionnant à sec, la cloche est cylindrique et le couple transmissible ne dépend que du carré de la vitesse de l'arbre moteur, ce qui donne une progressivité satisfaisante pour le démarrage en cas d'inerties faibles (embrayage centrifuge d'automobile légère). Dans les systèmes comportant de l'huile, celle-ci, interposée entre les surfaces de friction, réduit beaucoup le coefficient de frottement au départ, puis elle est éliminée par la force centrifuge et se rassemble dans un espace annulaire : il en résulte une très grande progressivité. De plus, les surfaces de contact masselottes-cloche sont coniques, ce qui accroît le couple transmissible pour un même encombrement (fig. V-26 :

poulie D.E.M. à embrayage centrifuge dans l'huile permettant le démarrage à vide d'un moteur électrique). Il faut noter que les coupleurs ne sont pas débrayables en marche.

2.3.2. Embrayages à entraînement hydraulique. — Dans un accouplement hydraulique, l'entraînement s'effectue sans aucune liaison mécanique entre les parties motrices et réceptrices, assurant ainsi une très grande progressivité. Le fonctionnement est automatique, d'où le nom de coupleur hydraulique. Les deux éléments essentiels (couronne motrice jouant le rôle de pompe centrifuge et couronne réceptrice jouant le rôle de turbine centripète) ont la forme d'un demi-tore et sont munis d'ailettes planes disposées radialement. Un carter fixé à l'élément moteur et coiffant la turbine forme un ensemble étanche qui renferme le liquide de travail (fig. V-27). Lorsque les deux éléments

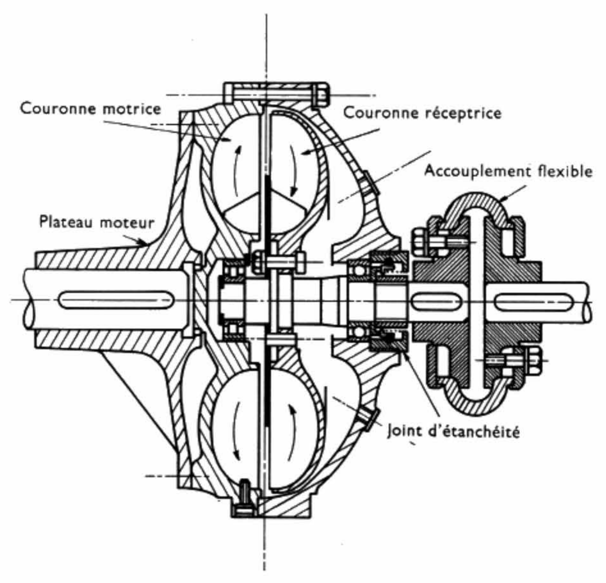


Fig. V-27 — Coupleur hydraulique (*Ferlec-Sinclair*)

tournent à la même vitesse, les pressions centrifuges dans la pompe et dans la turbine sont égales et il n'y a aucune circulation du liquide : dans ces conditions, aucun couple n'est transmis. Si la vitesse de l'arbre récepteur est inférieure à celle de l'arbre moteur, la pression centrifuge dans la turbine est plus faible et il s'établit une circulation méridienne de la pompe vers la turbine, comme indiqué par les flèches. La vitesse circonférentielle du liquide sortant de la pompe est alors plus grande que celles des ailettes de la turbine sur lesquelles le liquide exerce donc un couple moteur. Ce couple est proportionnel au glissement, c'est-à-dire à la différence de vitesse des deux arbres exprimée en centièmes de la vitesse de l'arbre moteur et il est maximal pour un glissement de 100 % (arbre récepteur calé) ; par ailleurs, pour un glissement donné, il est proportionnel au carré de la vitesse de l'arbre moteur (V. t. 4, La route, Embrayage).

En pratique, un coupleur hydraulique est déterminé de telle sorte que sous le couple normal, son glissement soit de l'ordre de 2 à 3 %. Le glissement maximal doit rester inférieur à 10 % pour limiter l'échauffement. Comme il y a toujours égalité des couples, le rendement mécanique de l'appareil est le complément à 100 du glissement. Du fait de sa symétrie, le coupleur hydraulique est absolument réversible et, les ailettes étant radiales, son sens de rotation est indifférent.

3. PALIERS

Les paliers sont utilisés pour guider les arbres en rotation et pour reporter leur charge sur un appui fixe.

On utilise des paliers lisses ou des paliers à billes : dans les premiers, l'arbre porte directement sur des coussinets et il y a frottement à sec, onctueux ou hydrodynamique suivant les conditions de graissage ; dans les seconds, le roulement est substitué au glissement.

3.1. Paliers lisses. — Suivant l'orientation de l'arbre et le sens de la charge à laquelle ils sont soumis, on distingue :

— les paliers porteurs (axe horizontal, charge radiale) ;
— les paliers de butée (axe horizontal, charge axiale) ;
— les boîtards (axe vertical, charge radiale) ;
— les crapaudines (axe vertical, charges axiale et radiale).

À l'intérieur de ces types, les différences sont dues au dispositif de graissage adopté (V. chap. 3, § 4) dont le choix est dicté par les conditions d'emploi du palier.

3.1.1. Coussinets. — Ce sont les pièces du palier sur lesquelles porte l'arbre : bagues cylindriques ou demi-coquilles emboîtées dans le corps et le chapeau, ils peuvent être facilement remplacés.

1° *Coussinets métalliques.* — Ils sont soit monoblocs (bronze ordinaire ou phosphoreux, fonte douce ; fig. V-28)

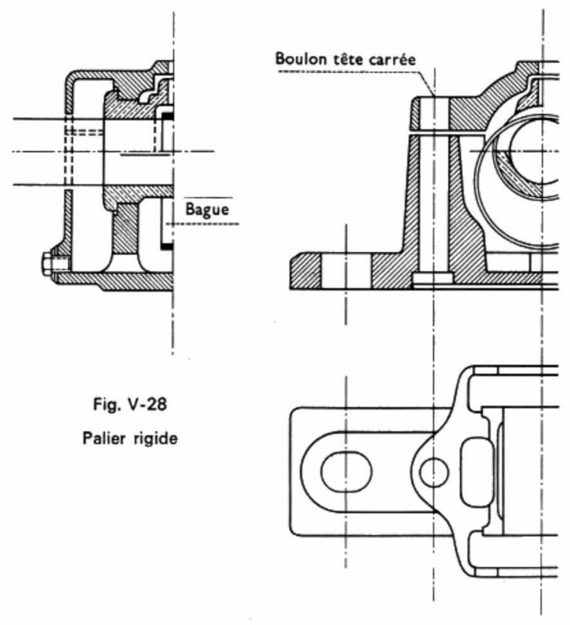


Fig. V-28
Palier rigide

et réservés pour des charges faibles ou moyennes à faible vitesse, soit formés d'une coquille en fonte (V. fig. V-32, 3) ou d'un feuillard d'acier (fig. V-29) garnis d'une couche mince d'antifriction. Ces antifrictions sont :

— à base de plomb, avec addition d'antimoine et d'étain, pour les charges moyennes à vitesse élevée (coussinets d'essieu de wagons, aéronautique et mécanique générale) ;
— à base d'étain, avec addition de plomb, pour avoir une meilleure résistance à l'usure dans les applications précédentes ;
— à base d'étain, avec addition d'antimoine et de cuivre, pour les charges élevées (moteurs à explosion) ;
— à base de cadmium, avec addition de nickel ou de cuivre, pour les applications spéciales.

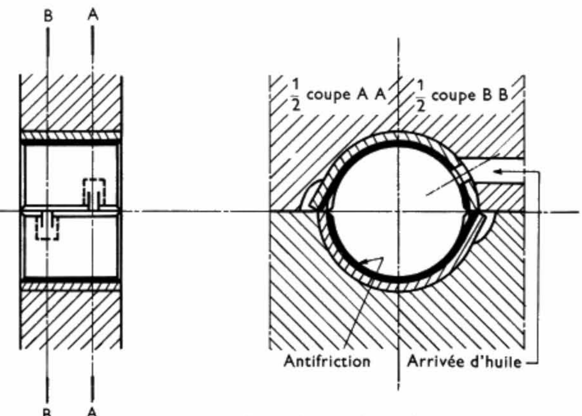


Fig. V-29 — Palier à coussinet mince

Les coussinets métalliques nécessitent un graissage abondant : barbotage avec bague ou graissage sous pression.

2° *Patins Michell.* — Afin de réduire la température de fonctionnement, on remplace le film d'huile porteur partiel (V. fig. III-8) par un film d'huile réparti sur toute la périphérie de l'arbre. Pour cela, le coussinet est constitué par des patins pivotants assurant chacun la formation d'un film d'huile en forme de coin ; c'est le principe des paliers Michell (fig. V-30) qui admettent des charges et des vitesses plus élevées que les coussinets métalliques. Les patins sont en bronze phosphoreux pour les vitesses moyennes et en fonte garnie d'antifriction pour les grandes vitesses.

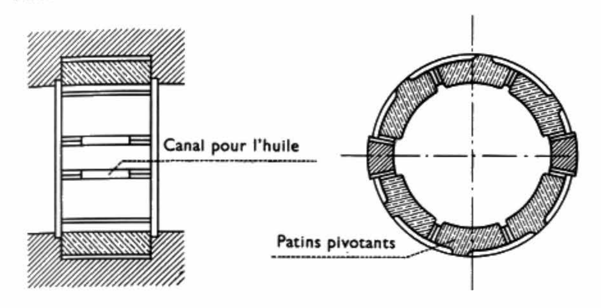


Fig. V-30 — Schéma de principe des paliers Michell

3° *Coussinets en matière plastique.* — L'industrie mécanique utilise pour la fabrication de coussinets et de pignons des polyamides (nylon, technyl et rilsan) aux caractéristiques élevées (bas coefficient de frottement, grande résistance à l'usure et à l'abrasion, bonne résistance à la flexion et à la compression). Ce choix est favorisé par le silence et la possibilité de fonctionnement sans lubrification des pièces en polyamide, par la résistance de ce matériau à la corrosion et par sa légèreté. Les coefficients de frottement obtenus sont : 0,15 sans lubrification, 0,13 avec lubrification à l'eau et 0,03 avec lubrification à l'huile.
Par suite du faible coefficient de conductibilité thermique et du coefficient de dilatation linéaire important, le problème essentiel est l'évacuation de la chaleur ; d'où les limites du produit $p.v$: 510 bar.m/mn à sec, 1 020 bar.m/mn lubrifié à l'eau et 2 040 bar.m/mn lubrifié à l'huile. De plus, les parois sont minces (0,6 à 2 mm) pour faciliter l'évacuation de la chaleur et l'allongement circonférentiel est compensé soit par un jeu de 1 % du diamètre de l'arbre, soit par une fente de compensation suivant une génératrice sans modification de l'alésage du coussinet.

3.1.2. Paliers porteurs

1° *Support plat.* — En une seule pièce et muni d'un godet graisseur avec mèche ou d'un graisseur Stauffer, c'est le palier le plus simple. Généralement en fonte et d'un prix très faible, il ne peut être utilisé que pour des mécanismes rudimentaires et à faible vitesse ; de plus, le montage de l'arbre dans le sens axial est délicat.

2° *Palier rigide en deux pièces.* — Il se compose d'un corps et d'un chapeau en fonte, assemblés par des boulons. L'arbre s'appuie sur deux coussinets en bronze ou en fonte garnie d'antifriction, ajustés dans le corps et le chapeau (V. fig. V-28) : son montage radial est facile. L'emploi de coussinets autorise des charges et des vitesses élevées. Le graissage s'effectue par graisseur à mèche ou par bague ; l'huile est ensuite répartie sur l'arbre par l'intermédiaire de pattes d'araignées et de chanfreins creusés dans le coussinet.

3° *Palier articulé.* — Les paliers rigides exigent un alignement rigoureux de la ligne d'arbre ; malgré cela si l'arbre est sollicité à la flexion, la répartition de la pression sur le coussinet est irrégulière. Pour remédier à ces inconvénients, on réalise des paliers à rotule sphérique où l'alignement est automatique :
— Le palier à rotule intérieure (fig. V-31) ne permet qu'une faible orientation des coussinets sans risque de frottement de l'arbre sur le corps ;
— Le palier à rotule extérieure peut être orienté suivant les nécessités du montage et assure une très bonne

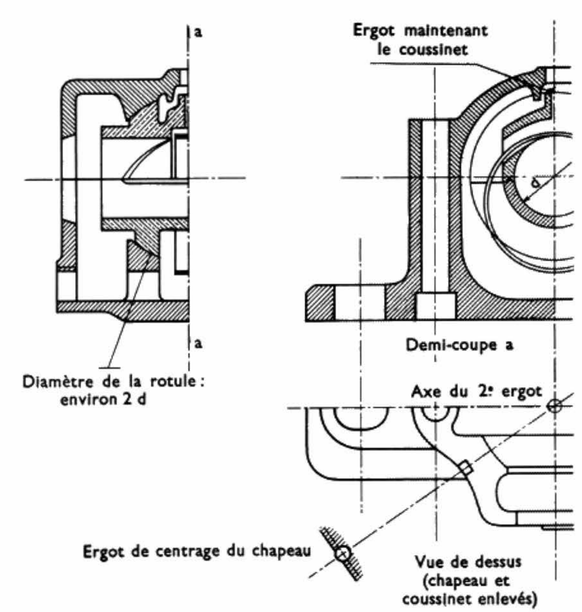


Fig. V-31 — Palier à rotule intérieure

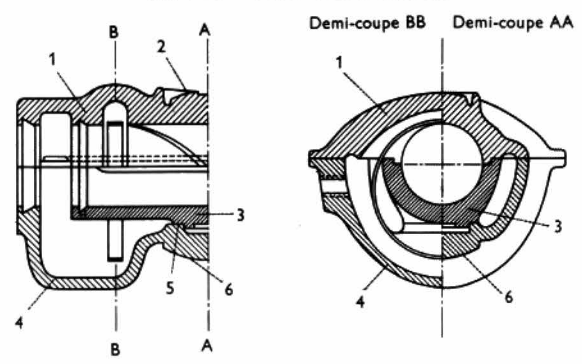


Fig. V-32 — Palier à rotule extérieure

étanchéité, même aux grandes vitesses (fig. V-32 ; le support à rotule n'est pas représenté).

3.1.3. Paliers de butée. — Ils s'opposent aux déplacements axiaux de l'arbre. Une ou deux bagues d'arrêt, bloquées sur l'arbre, portent sur les joues du coussinet dans les cas de très faibles charges. Pour les efforts importants (arbre d'hélice de turbine, etc.) on utilise la butée Michell (fig. V-33) : l'arbre est muni d'un collet de forte section qui transmet la poussée axiale à des patins pivotants assurant chacun la formation d'un film d'huile en forme de coin : ces paliers admettent des vitesses élevées.

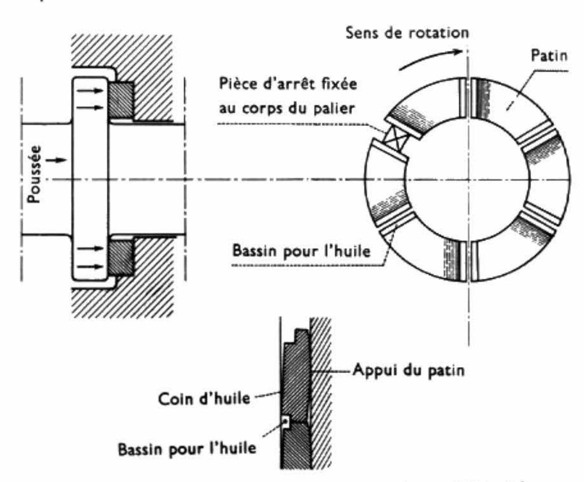


Fig. V-33 — Schéma de principe de la butée Michell

3.1.4. Boitards. — Utilisés pour le guidage radial d'arbres verticaux, ils se fixent verticalement ou horizontalement.

1° *Boitard fixé sur paroi verticale* (fig. V-34). — Il diffère d'un palier porteur par le système de graissage dont la réalisation doit éviter les fuites ; le corps et le chapeau ont chacun un réservoir d'huile d'où le lubrifiant est amené au coussinet par des mèches ou des rotins ; les coussinets comportent une rainure d'arrêt d'huile qui limite les écoulements le long de l'arbre.

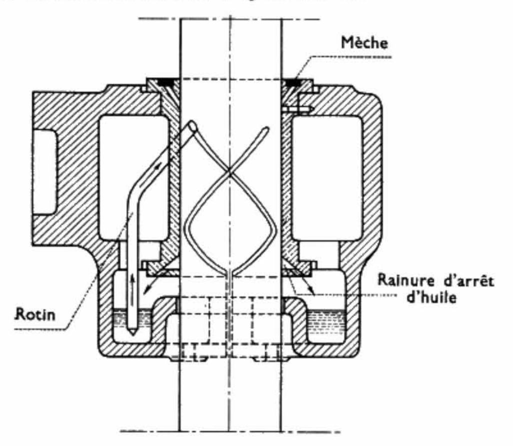


Fig. V-34 — Boitard fixé sur paroi verticale

2° *Boitard fixé sur paroi horizontale* (fig. V-35). — C'est souvent le seul montage possible ; l'arbre y est guidé par trois patins réglables jouant le rôle des coussinets et le graissage est assuré par de l'étoupe suiffée.

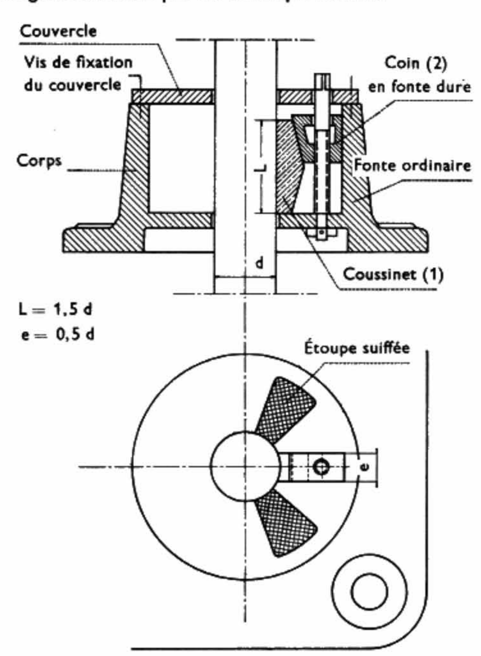


Fig. V-35 — Boitard fixé sur paroi horizontale

3.1.5. Crapaudines. — C'est l'ensemble constitué par un palier de butée supportant un arbre vertical et un palier de guidage encaissant les charges radiales.

1° *Crapaudine rigide.* — Dans le cas de charges moyennes, la crapaudine comporte une simple bague en bronze guidant l'arbre et un grain en acier trempé sur lequel tourne l'extrémité inférieure, cémentée et trempée, de l'arbre. Une variante comporte l'ensemble coussinet et grain monté dans un corps en fonte dont on peut régler la position : on a ainsi une crapaudine réglable (fig. V-36). Souvent, la portée du grain sur le corps est sphérique pour

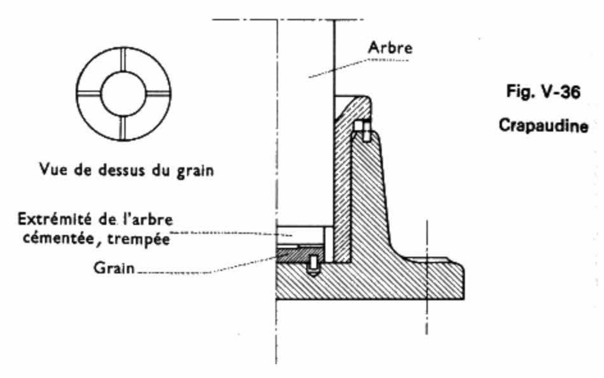


Fig. V-36
Crapaudine

assurer un contact parfait de l'arbre sur le grain. Dans le cas de charges importantes ou quand il est impossible de placer la crapaudine à la partie inférieure, on soutient l'arbre à sa partie supérieure par un collet qui augmente la surface de contact avec le grain et qui peut être rapporté. Le grain est alors annulaire et disposé au-dessus du palier de guidage (V. fig. V-37).

2° *Crapaudine Michell* (fig. V-37). — Pour des charges très élevées, le grain est remplacé par des patins pivotants (2), en bronze phosphoreux, dont le graissage s'effectue par coin d'huile, et l'ensemble baigne dans le lubrifiant qui est réfrigéré par circulation. Ce type est notamment utilisé dans les turbines hydrauliques à axe vertical dont la partie inférieure est dans l'eau.

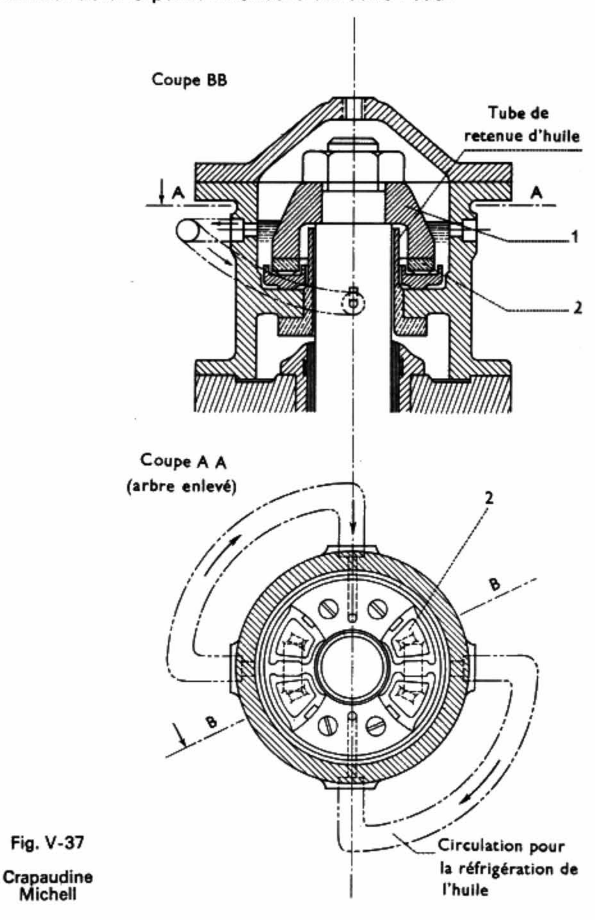


Fig. V-37
Crapaudine Michell

3.1.6. Supports de paliers. — Lorsqu'on établit une ligne d'arbres, on fixe les paliers soit directement sur le bâti de la machine, soit par l'intermédiaire de supports spéciaux scellés aux murs pour un bâtiment ou soudés à la structure pour un navire. La forme du support dépend de la position de sa surface de fixation par rapport à l'arbre.

1° *Semelle.* — C'est une plaque en fonte ou en acier dont la face d'appui pour le palier est usinée ; elle a des

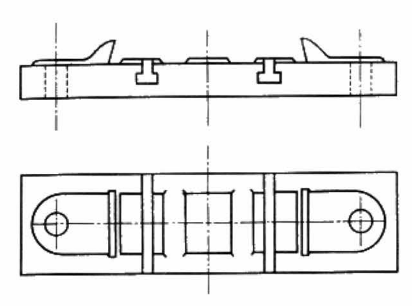


Fig. V-38 — Semelle

dimensions supérieures à la longueur du palier pour permettre le réglage transversal. Cette face est lisse pour les petits diamètres et épaulée pour les diamètres d'arbres supérieurs à 100 mm (fig. V-38).

2° *Chaise*. — Lorsque la transmission est suspendue on utilise une chaise pendante (fig. V-39) à une ou deux jambes, suivant les efforts qu'elle supporte. Si la transmission est disposée le long d'une paroi, on emploie une chaise console (fig. V-40) et si elle est à une certaine distance du sol, une chaise sur sol qui évite la construction d'un massif de maçonnerie. Dans le cas des paliers à rotule extérieure, la chaise pendante peut être utilisée comme chaise sur sol par retournement du support à rotule du palier.

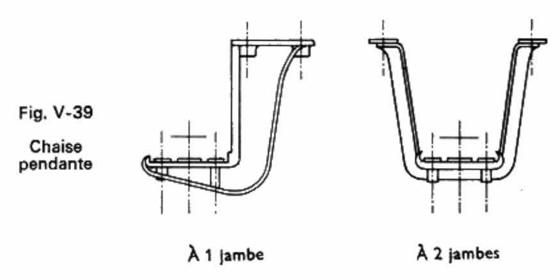


Fig. V-39 Chaise pendante

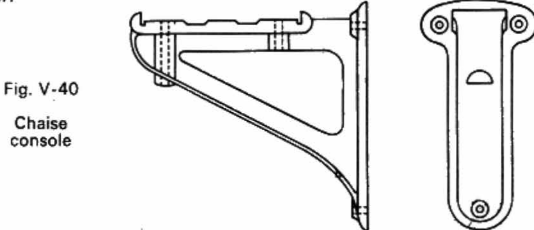


Fig. V-40 Chaise console

3° *Niche*. — Lorsqu'une transmission traverse une paroi, on place le palier dans un support spécial appelé niche et fixé dans l'épaisseur de la paroi, à la résistance de laquelle il participe.

4° *Pendart*. — Ce support est une chaise pendante orientable et réglable (fig. V-41). Équipé d'un palier spécial à manchon *p*, il est exceptionnellement utilisé à l'heure actuelle.

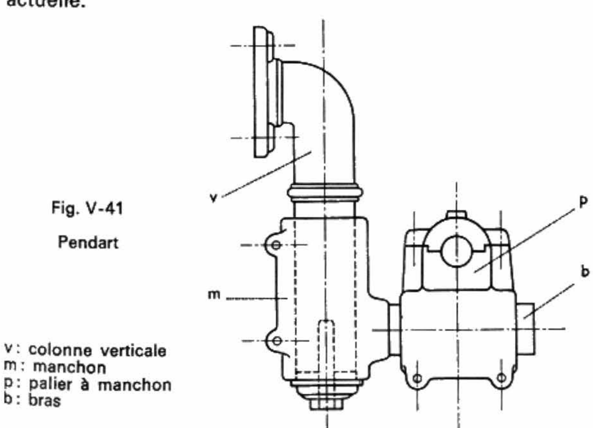


Fig. V-41 Pendart

v : colonne verticale
m : manchon
p : palier à manchon
b : bras

3.2. Paliers fluides. — Leur principe les rend autocentreurs et supprime tout contact entre l'arbre et le palier, donc toute usure, si la pompe d'alimentation est indépendante du mouvement de l'arbre (V. chap. 3, § 3.1.4.). De plus, la masse tournante tourne librement autour de son axe d'inertie, donc sans vibration, même à très grande vitesse. Enfin, leur frottement est fortement diminué si le fluide utilisé a une très faible viscosité : c'est le cas de l'air dont l'emploi supprime du même coup les problèmes d'étanchéité.

Pour soutenir un arbre soumis à des forces variables, les gicleurs de toutes les chambres sont alimentés sous la même pression (fig. V-42).

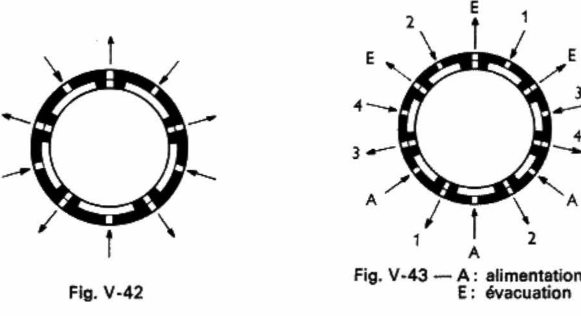


Fig. V-42

Fig. V-43 — A : alimentation
E : évacuation

Pour compenser une force constante telle que la pesanteur, les chambres inférieures sont seules alimentées directement, chacune des rainures d'échappement inférieures alimentant la chambre supérieure qui lui est diamétralement opposée et les rainures supérieures assurant l'évacuation du fluide (fig. V-43).

3.3. Papiers à roulements. — Les avantages des roulements (V. chap. 4) ont conduit à concevoir des paliers à roulements qui supplantent actuellement les paliers lisses dans la plupart des applications. Cependant, pour les butées à grande capacité de charge, la butée Michell donne encore les meilleurs résultats.

3.3.1. Paliers à charge radiale (fig. V-44). — Ils sont équipés d'un roulement à rotule sur billes ou sur rouleaux permettant la flexion de l'arbre et admettant une forte charge radiale. L'étanchéité est réalisée par des feutres imprégnés d'huile et de suif. Les conditions de graissage sont celles des roulements (V. chap. 4 § 4). Pour assurer au roulement la durée maximale, il est important que l'assise du palier soit bien plane.

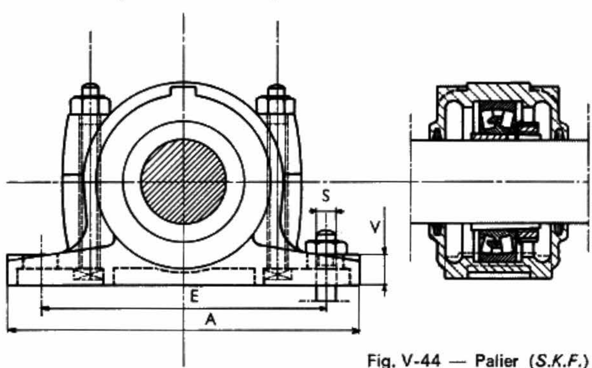


Fig. V-44 — Palier (*S.K.F.*)

Si l'arbre est supporté par plusieurs paliers, l'alignement de ceux-ci doit être rigoureux (sinon les roulements subissent des surcharges conduisant à une usure prématurée) et le maintien axial de l'arbre doit être assuré par un seul roulement sinon la dilatation crée dans les autres paliers des efforts axiaux préjudiciables à la tenue des roulements (fig. V-45).

Ces paliers sont exécutés pour le montage en paliers libres avec logement plus large que la bague extérieure du roulement. Dans le palier de maintien axial, le roulement est immobilisé par une ou deux bagues d'arrêt (fig. V-46).

Le joint diamétral assure un montage facile. Cependant, le logement du roulement étant usiné corps et chapeau

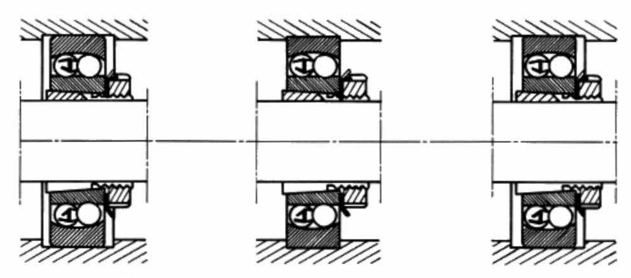
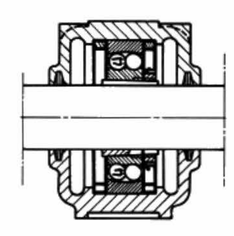


Fig. V-45 — Un seul roulement maintient l'arbre dans le sens axial ; les autres sont libres (*S.K.F.*)



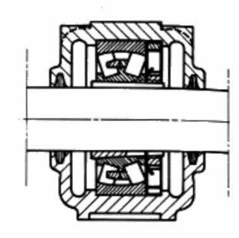


Fig. V-46 — Montage des bagues d'arrêt (*S.K.F.*)

assemblés, il est important au montage de les assembler de la même façon et il faut donc prendre soin de repérer ces deux pièces avant le démontage.

3.3.2. Paliers auto-aligneurs. — Ils sont équipés de roulements à billes à gorges profondes avec bague de blocage sur l'arbre et deux joints d'étanchéité. Ils sont graissés au montage par le constructeur. Leur conception compense les défauts d'alignements grâce à la surface extérieure sphérique de la bague extérieure. Leur tolérance d'alésage, autorisée par le dispositif de blocage, facilite le montage. Ces paliers apportent dans un grand nombre d'applications une solution techniquement et économiquement intéressante (transporteurs, appareils de levage, machines agricoles, machines alimentaires, appareils de triage, machines d'emballage, machines textiles, etc.).

1° *Palier en fonte* (fig. V-47). — Ce modèle à semelle horizontale et de forme classique est destiné à une fixation sur une paroi ou un support horizontal.

2° *Palier en fonte à bride verticale* (fig. V-48). — Il est utilisé pour une fixation sur une paroi verticale traversée par l'arbre.

3° *Palier en tôle* (fig. V-49). — De conception légère et de réalisation économique, il est destiné à une fixation sur une paroi horizontale.

Fig. V-47

Palier auto-aligneur en fonte (*S.K.F.*)

Fig. V-48

Palier à bride verticale (*S.K.F.*)

Fig. V-49

Palier en tôle (*S.K.F.*)

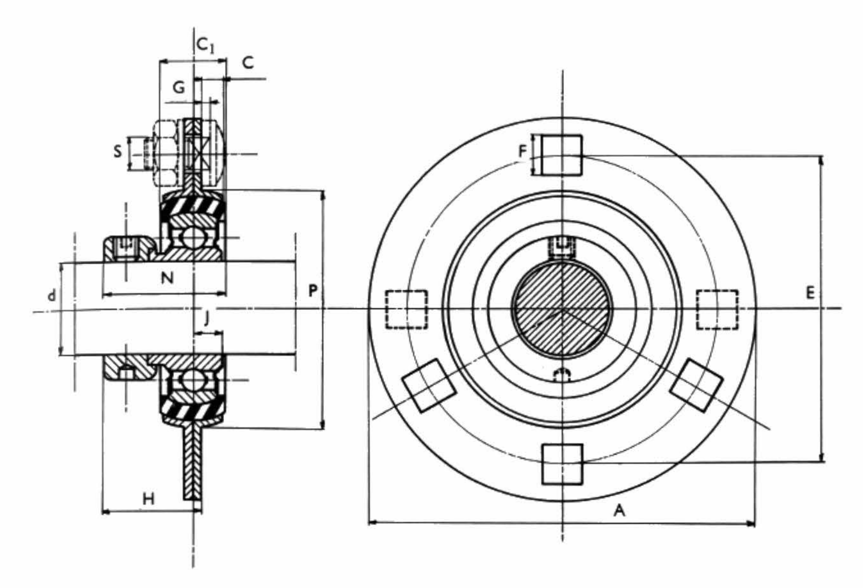


Fig. V-50

Palier à douille en caoutchouc (*S.K.F.*)

4° *Palier en tôle avec douille en caoutchouc* (fig. V-50). — Ce modèle est employé pour des applications particulières où il permet notamment l'amortissement des vibrations grâce à l'élasticité de la douille. Il est conçu pour une fixation sur une paroi verticale traversée par l'arbre.

4. COURROIES ET CONVOYEURS À BANDES

La commande par courroie est utilisée pour transmettre la puissance entre deux arbres dont la distance n'est pas trop importante, généralement moins de douze mètres.

Une courroie, constituée par une bande sans fin passant sur deux poulies, transmet l'énergie grâce à son adhérence sur les poulies.

4.1. Courroies plates

4.1.1. Matériaux

1° *Cuir.* — Utilisé de tout temps pour fabriquer des courroies, c'est de la peau de bœuf tannée puis séchée sous tension pour limiter son allongement en service. Sa contrainte admissible en traction est de 4 N/mm² et son coefficient de frottement atteint 0,2.

2° *Cuir et polyamide.* — Dans certaines courroies, le cuir donne l'adhérence et une feuille de polyamide assure la résistance.

3° *Coton et caoutchouc naturel.* — Pour les applications à des températures supérieures à 60 °C, que le cuir ne supporte pas, on utilise des bandes en toile de coton imprégnées de caoutchouc, celui-ci donnant l'adhérence. Ce matériau est le plus répandu et répond à presque tous les problèmes de courroies plates. Sa contrainte admissible est de 5 N/mm² et son coefficient de frottement atteint 0,35.

4° *Textile et caoutchouc synthétiques.* — Leurs caractéristiques mécaniques permettent des vitesses élevées; ils sont aussi employés pour leur résistance aux hydrocarbures. Leur coefficient de frottement atteint 0,5.

4.1.2. Jonctions des extrémités. — Les courroies sans fin, les plus utilisées, sont directement obtenues à la fabrication ; leur mise en place est délicate dans les systèmes sans tendeurs et peut nécessiter le démontage des paliers. Pour les courroies discontinues, la jonction est réalisée au montage, soit par collage ou couture des extrémités (coupées en sifflet) qui se chevauchent, soit par l'intermédiaire de pièces métalliques appelées agrafes, démontables ou non. Ces dernières donnent une augmentation locale de poids, gênante à grande vitesse.

4.1.3. Dimensions. — Les largeurs (de 16 à 500 mm) et les longueurs (de 400 à 10 000 mm) font l'objet des normes NF E 24-101 et 102.

4.1.4. Calcul. — Soit une poulie motrice de diamètre d, tournant à la vitesse n et transmettant une puissance P, par l'intermédiaire d'une courroie, à une poulie de diamètre D tournant à la vitesse N; s'il n'y a pas glissement, la vitesse tangentielle V, qui est la vitesse linéaire de la courroie, sera la même pour les deux poulies, soit :

$$V = \pi D . N = \pi d . n$$

d'où le rapport de la transmission :

$$\frac{N}{n} = \frac{d}{D}$$

Pendant le mouvement, les tensions des deux brins de la courroie sont différentes (fig. V-51 a) : le brin libre exerce sur la poulie motrice un effort tangentiel t et le brin tendu un effort tangentiel T (fig. V-51 b). Si F est l'effort tangentiel

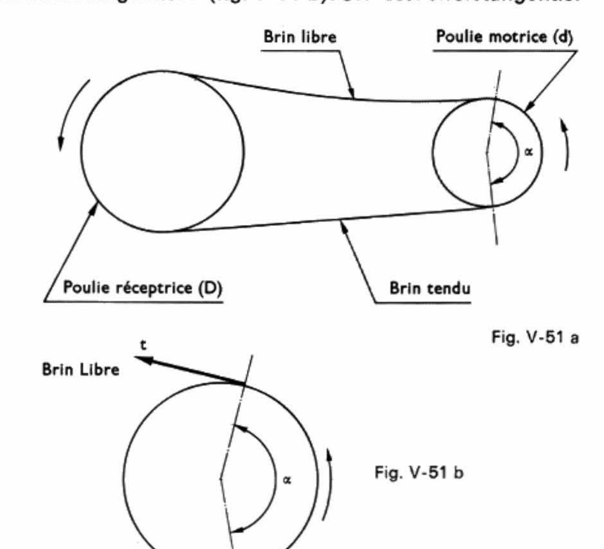


Fig. V-51 a

Fig. V-51 b

correspondant à la puissance à transmettre P, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que :

$$F = T - t$$

soit :

$$P = F . V = (T - t)\, V$$

avec :

P : en watts,
V : en mètres par seconde,
F, T et t ; en newtons.

Les efforts T et t sont liés par la formule de Sauveur, appelée formule de Rankine par les Anglo-Saxons, qui s'établit en étudiant un petit élément de courroie AB en

Fig. V-52

contact avec la poulie suivant un arc $d\alpha$ (fig. V-52). Cet élément est en équilibre sous l'action des tensions θ et $\theta + d\theta$ agissant sur ses sections d'extrémité de la résultante p des forces de pression de la poulie sur la courroie et de l'adhérence $f.p$ correspondante, f étant le coefficient de frottement de la courroie sur la poulie. Comme il n'y a pas glissement, on a :

$$d\theta = f.p$$

Par ailleurs, $d\alpha$ étant très petit, on a :

$$p = 2\,\theta \frac{d\alpha}{2}$$

d'où :

$$\frac{d\theta}{\theta} = f.d\alpha$$

et, en intégrant le long de l'arc α :

$$\Big[\log_e \theta\Big]_t^T = \log_e \frac{T}{t} = f.\alpha$$

ou :

$$T = t.\mathbf{e}^{f\alpha}$$

Cette relation fondamentale de la variation de tension d'une courroie le long de la poulie sur laquelle elle est enroulée, permet de déterminer, en fonction de l'arc d'enroulement α et de l'effort tangentiel à transmettre F, la tension initiale T_0 (tension à l'arrêt), soit :

$$T_0 = \frac{T+t}{2} = \frac{F}{2}\,\frac{\mathbf{e}^{f\alpha}+1}{\mathbf{e}^{f\alpha}-1}$$

et la section S de la courroie, soit :

$$S = \frac{R}{T} = \frac{F}{R}\,\frac{\mathbf{e}^{f\alpha}}{\mathbf{e}^{f\alpha}-1}$$

avec :

S : en millimètres carrés,
F et T_0 : en newtons,
R : en newtons par millimètres carrés,
R est égale à la contrainte admissible à l'extension R_p du matériau de la courroie, diminuée de la contrainte n_1 due à la flexion par enroulement sur la plus petite des deux poulies et de la contrainte n_2 due à la force centrifuge, soit :

$$R = R_p - (n_1 + n_2) = R_p - (E\frac{e}{d} + m.V^2)$$

avec :

E : module d'élasticité longitudinal,
m : masse volumique du matériau,
e : épaisseur de la courroie.

Ces différentes formules montrent que les courroies minces et de faible masse volumique ainsi que les grands arcs d'enroulement et les grands coefficients de frottement sont avantageux. À l'inverse, les poulies de petit diamètre et les vitesses tangentielles importantes sont déconseillées.

Remarque : Une courroie trop épaisse ou trop raide s'enroule mal sur la poulie et son arc de contact réel est inférieur à l'arc de contact théorique.

4.1.5. Glissement fonctionnel et patinage. — Du fait de son élasticité et de la variation de sa tension le long de l'arc d'enroulement, la longueur de l'élément de courroie AB varie entre le point où il prend contact avec une poulie et celui où il la quitte. Il en résulte une contraction de la courroie répartie le long de la poulie motrice et un allongement le long de la poulie réceptrice, qui s'accompagnent nécessairement d'un glissement progressif de la face interne de la courroie sur la poulie. Ce glissement, appelé *glissement fonctionnel* ou glissement *vermiculaire*, existe toujours ; il peut dépasser 2 % et se mesure en faisant la différence entre le rapport de la transmission à vide et son rapport en charge.

Il n'y a patinage, c'est-à-dire glissement généralisé sur toute la surface de contact, que si l'effort tangentiel à transmettre est supérieur à ce que permettent la tension initiale, l'arc de contact réel et le coefficient de frottement entre courroie et poulie.

Les courroies en cuir supportent bien le patinage qui est parfois utilisé pour obtenir un démarrage progressif. Les courroies coton-caoutchouc le supportent moins bien.

4.1.6. Durée de service. — Une courroie fléchit au point où elle aborde une poulie et se redresse au point où elle la quitte : les déformations correspondantes de sa face interne entraînent son usure par des glissements locaux et l'amplitude correspondante des variations de tension de sa face externe limite le nombre d'enroulements qu'elle peut subir avant rupture par fatigue. Ces phénomènes augmentent avec l'épaisseur de la courroie, avec sa tension initiale, avec sa fréquence de passage (rapport de sa vitesse linéaire et de sa longueur), avec la vitesse de rotation des poulies et avec l'inverse du diamètre des poulies. Il y a donc intérêt à réduire la valeur de ces facteurs pour accroître la durée de service. Cela explique le succès des courroies ultraminces à armature monocorde capables d'entraîner à 25 000 tr/mn une poulie de 25 mm de diamètre (fig. V-53).

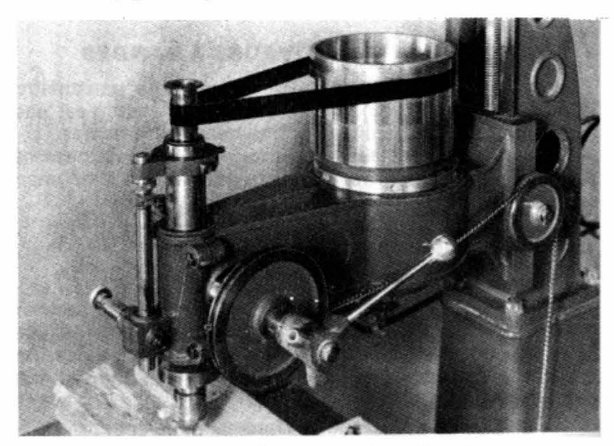


Fig. V-53 — Poulie motrice : N = 3 000 tr/mn ; poulie réceptrice n = 22 000 tr/mn (*Kléber-Colombes*)

Remarque : Ce serait une erreur de surdimensionner une courroie car les consignes du fabricant pour sa tension initiale conduiraient à surcharger les paliers et à réduire leur durée de service.

4.1.7. Entretien. — L'entretien des courroies plates est insignifiant : il consiste à s'assurer que les poulies restent propres et que les courroies sont normalement tendues. Pour les courroies en caoutchouc, il ne faut utiliser ni adhésif ni huile. Les courroies en magasin doivent être conservées à l'abri du soleil, de la chaleur et de l'humidité.

4.1.8. Étude d'une installation. — Connaissant les vitesses des arbres et la puissance à transmettre, on multiplie cette dernière par le coefficient de service de la machine à commander (pour l'établir on tient compte des irrégularités du couple résistant). Avec cette puissance corrigée, on choisit dans les notices du fabricant le diamètre de la petite poulie donnant une largeur de courroie et un diamètre de la grande poulie satisfaisante. On adopte des dimensions de poulies et une longueur de courroie normalisées. Éventuellement, l'emploi d'un galet enrouleur, placé sur le brin mou à proximité de la poulie motrice, permet d'augmenter l'arc d'enroulement : on peut ainsi atteindre 270°.

Remarque 1 : Il faut noter qu'une courroie plus chère mais acceptant de plus petites poulies peut entraîner une économie sur l'ensemble de la transmission en même temps qu'un grain d'encombrement. Enfin, pour le réglage

de la tension, on doit prévoir des glissières dont la course soit d'au moins 5 % de la longueur de la courroie dans une direction sensiblement parallèle à la ligne des centres.

Remarque 2: La tension initiale doit respecter les notices du fabricant car les consignes sont très différentes selon les types de courroies; elle doit être contrôler après quelques heures de service.

4.2. Courroies trapézoïdales. — Bien que le premier brevet de courroie trapézoïdale date des environs de 1 900, c'est seulement vers 1925 que la firme américaine Allis-Chalmers lançait industriellement la fabrication de transmission par courroies trapézoïdales multiples, sous la marque Texrope. Le domaine d'application de ces courroies n'a pas cessé de se développer depuis, surtout du fait de leur grande adhérence. Particulièrement indiquées pour des vitesses de 300 à 3 000 tr/mn mais capables d'atteindre 8 000 tr/mn (courroies étroites), elles permettent de transmettre des puissances allant de 35 W à 1 500 kW et plus (fig. V-54: ventilateur d'aération de mines de 1 100 kW).

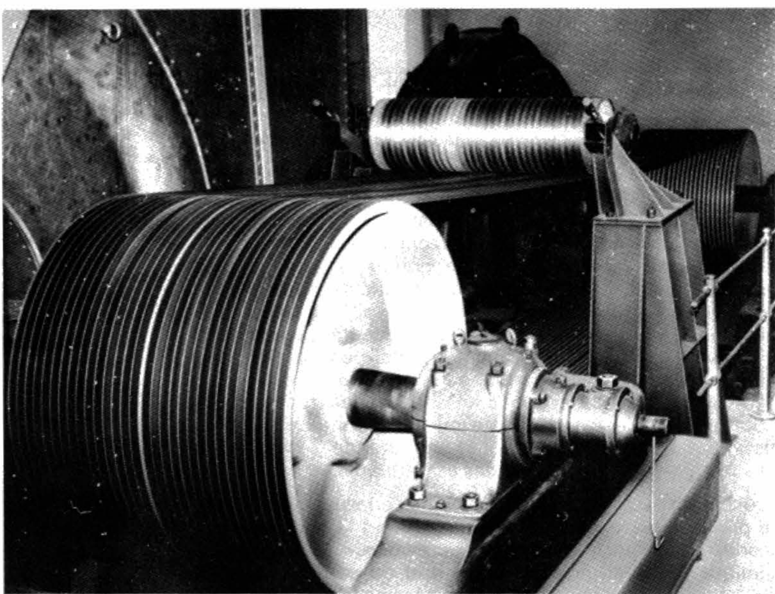


Fig. V-54

Transmission de 1 100 kW par courroies trapézoïdales (*Kléber-Colombes*)

4.2.1. Structure. — La plupart des courroies trapézoïdales sont fabriquées sans fin; d'ailleurs, seule cette exécution répond aux exigences simultanées d'uniformité de section, d'endurance au pliage et d'équilibrage dynamique. Les petites sections (8 mm × 5 mm et au-dessous) peuvent être constituées d'un seul matériau mis en forme par moulage (caoutchouc, polyuréthanne) ou par extrusion (matière thermoplastique); de telles courroies, très extensibles, ne peuvent transmettre que de faibles puissances à des vitesses n'excédant guère 10 m/s. Pour les sections de 10 mm × 6 mm et au-dessus, le caoutchouc est moulé sur une armature de traction, qui limite l'allongement. Les flancs sont nus ou entoilés.

1° *L'armature.* — Elle peut être répartie dans toute la section: elle est alors constituée d'un écheveau de câbles textiles ou d'un anneau de tissu roulé transversalement sur lui-même (aspect en spirale d'une section droite). Ce type d'armature est peu employé car il utilise mal le textile et donne des courroies peu flexibles. À section d'armature égale, la souplesse s'obtient en localisant les câbles dans une zone de faible épaisseur: c'est le type d'armature le plus utilisé. Pour accroître encore sa souplesse (aptitude aux petits diamètres et aux grandes vitesses de rotation), l'armature comporte une seule couche constituée par un câble unique enroulé en hélice à spires jointives (courroie monocorde; fig. V-55). Pour améliorer sa capacité de traction à section égale, l'armature comprend plusieurs couches superposées obtenues par enroulement d'une bande d'un tissu sans trame (tissu *cord*, utilisé aussi dans la fabrication des pneumatiques; fig. V-56). Dans le premier cas, l'alignement des poulies doit être soigné; dans le second, la vitesse maximale est limitée.

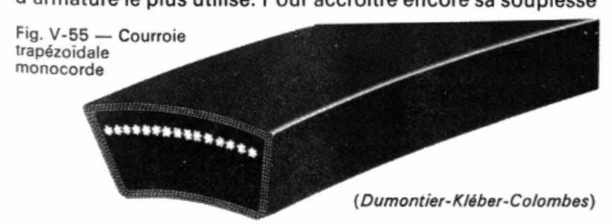


Fig. V-55 — Courroie trapézoïdale monocorde (*Dumontier-Kléber-Colombes*)

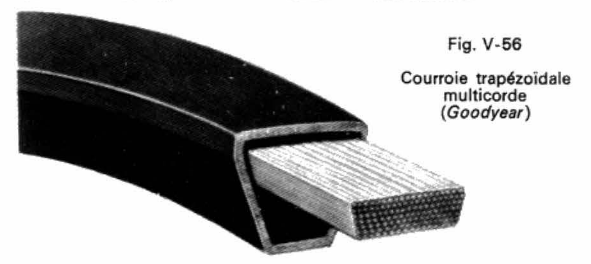


Fig. V-56

Courroie trapézoïdale multicorde (*Goodyear*)

Ces inconvénients disparaissent en concentrant l'armature autour de deux points: elle comporte alors deux câbles sans fin de forte section constitués par une corde unique toronnée sur elle-même et situés au tiers externe de l'épaisseur (fig. V-57).

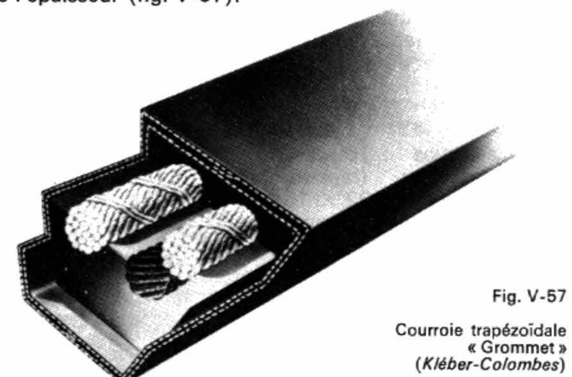


Fig. V-57

Courroie trapézoïdale « Grommet » (*Kléber-Colombes*)

Aucun des types ci-dessus ne convient aux courroies agrafables: leur armature est faite de couches superposées d'un tissu classique assez fort dont les fils de trame servent d'ancrage aux vis ou rivets d'assemblage. À structure et à charge de rupture identiques, l'endurance au pliage d'une armature dépend du textile utilisé; aussi, le coton a-t-il été abandonné au profit de la rayonne, puis du tergal et du nylon. Ces deux derniers ont même permis, à durée de service égale, d'accroître la puissance transmissible. La

rayonne reste employée pour son allongement élastique très faible : à cet égard, le métal serait préférable mais les courroies à armature acier supportent mal les faibles diamètres et les vitesses élevées.

2° *La base.* — C'est la partie de la courroie située au-dessous de l'armature ; pour assurer correctement le contact dans la gorge sans augmenter la raideur à la flexion, elle doit être à la fois souple dans le sens de la longueur et rigide dans celui de la largeur : le choix de la dureté du mélange constitue donc un compromis délicat, surtout pour les courroies larges. On évite cette difficulté en utilisant des mélanges fibreux dont les fibres textiles (orientés transversalement) limitent la flexion transversale de la courroie.

L'exécution encochée répond au même souci : généralisée pour les courroies de variateurs (fig. V-58), elle est également utilisée avec des profils classiques (poulies de très faible diamètre) et avec des profils étroits (régimes élevés : voiture de sport ou de compétition).

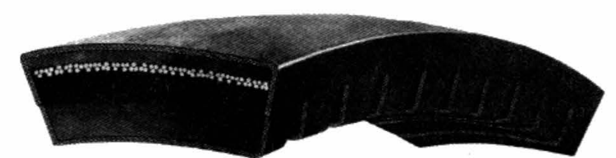


Fig. V-58 — Courroie trapézoïdale large pour variateur de vitesses (*Kléber-Colombes*)

3° *Les flancs.* — Si l'armature détermine l'effort transmissible, l'adhérence et la résistance à l'usure dépendent surtout des flancs. Dans la technique des flancs nus, un manchon (courroie plate de grande largeur, moulée sur ses faces interne et externe) est débité après vulcanisation en profils trapézoïdaux ; on obtient ainsi une adhérence élevée et indépendante du degré d'usure car il y a toujours contact caoutchouc-métal ; en contrepartie, il faut une cohésion exceptionnelle entre les constituants. Dans la technique des flancs entoilés, la plus répandue, la courroie est enveloppée d'une ou plusieurs couches d'un tissu caoutchouté, qui donne une grande résistance à l'usure et assure la cohésion des constituants.

4.2.2. Profil. — Lorsqu'on plie une courroie trapézoïdale, le profil de sa section se déforme : quand la courroie augmente, les flancs deviennent convexes et leur angle diminue. C'est pourquoi on définit et on contrôle le profil sur un tronçon maintenu rectiligne par une force déterminée en fonction de la section : dans ces conditions, le profil est un trapèze isocèle dont l'angle des flancs est voisin de 40°. Les particularités de forme du profil réel (flancs légèrement concaves devenant rectilignes pour un certain diamètre, dos bombé s'opposant à la flexion transversale) ne sont pas normalisées. Seules le sont les dimensions du trapèze théorique (grande base et hauteur). Les profils normalisés sont classés d'après leur rapport largeur/hauteur en :

- étroits : 10×8 à 22×18 (rapport moyen : 1,25)
- classiques : 10×6 à 38×25 (rapport moyen : 1,60)
- semi-larges : 32×15 à 50×22 (rapport moyen : 2,24)
- larges : $20 \times 6{,}3$ à 100×32 (rapport moyen : 3,15)

Les premiers (fig. V-61), d'un emploi général sur les moteurs d'automobiles (ventilateur, génératrice), conviennent pour des transmissions rapides et compactes, avec à-coups modérés. Les seconds, les plus répandus, couvrent la majorité des applications industrielles de 300 à 3 000 tr/mn. Les troisièmes ne sont employés que sur les moissonneuses-batteuses (propulsion et commande du batteur à vitesse variable). Les derniers (V. fig. V-58) sont réservés aux variateurs de vitesse industriels (V. § 4.2.7, 3°).

Il existe aussi des profils hexagonaux, dits *en double V* (fig. V-60) : ils permettent d'entraîner simultanément plusieurs arbres parallèles dans des sens de rotation différents.

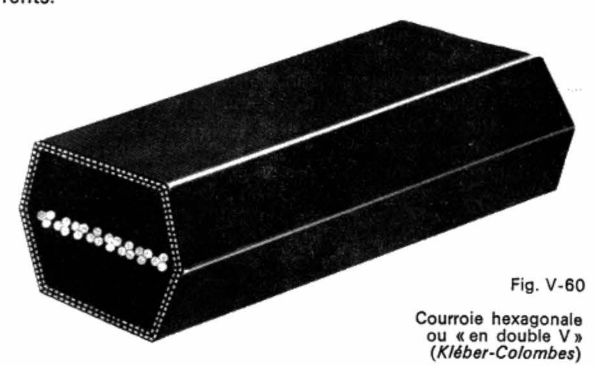


Fig. V-60

Courroie hexagonale ou « en double V » (*Kléber-Colombes*)

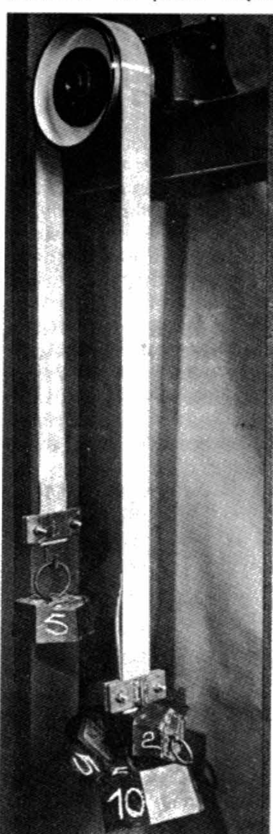
4.2.3. Adhérence et calcul. — L'adhérence est la qualité spécifique des courroies trapézoïdales ; elle résulte du contact oblique entre la gorge de la poulie et les flancs de la courroie. Pour un angle de gorge voisin de 36°, valeur usuelle, l'étude de l'équilibre d'un élément de courroie montre que l'on a :

$$d\,\theta \approx 3\,fp$$

Le calcul de la tension initiale des courroies plates (V. § 4.1.4) est donc applicable aux courroies trapézoïdales en prenant un coefficient d'adhérence fictif f' triple du coefficient de frottement réel f, soit en général :

$$f' = 1{,}2$$

Un test simple illustre, toutes choses égales, cet avantage essentiel du profil trapézoïdal (fig. V-61). Dans ces



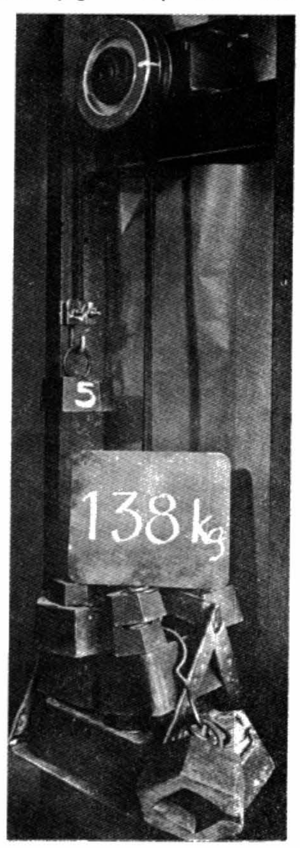


Fig. V-61

Tests d'adhérence d'une courroie plate composite (à gauche) et d'une courroie trapézoïdale (*Kléber-Colombes*)

Fig. V-59 — Courroie trapézoïdale étroite pour transmission rapide (*Kléber-Colombes*)

conditions, à même effort tangentiel à transmettre $F = T - t$, la tension initiale d'une courroie trapézoïdale sera beaucoup plus faible que celle de la courroie plate équivalente (ce qui permet d'augmenter la durée des roulements de palier ou de réduire leurs dimensions).

La valeur de F admissible par une courroie trapézoïdale est :

$$F = A - \frac{B}{d} - C\,V^2$$

d, étant le diamètre primitif de la plus petite des deux poulies ; A, B et C sont des paramètres liés aux caractéristiques physiques de la courroie et respectivement proportionnels à l'effort maximal admissible dans le brin moteur, à la raideur à la flexion et à la masse par unité de longueur. La puissance transmissible s'écrit alors :

$$P = \left(A - \frac{B}{d} - C\,V^2\right) V$$

Cette relation peut se représenter graphiquement par un réseau de courbes (P, V) tracées pour différentes valeurs du diamètre d (fig. V-62) ; données dans les catalogues

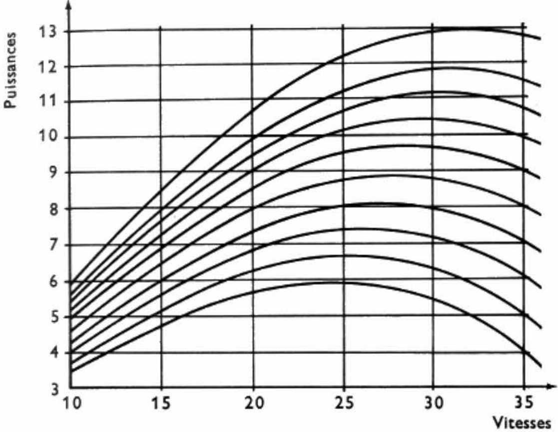


Fig. V-62 — Puissances et vitesses linéaires pour différents diamètres

des fabricants, elles facilitent le choix de la courroie répondant à un problème déterminé.

4.2.4. Stabilité cinématique. — Le glissement fonctionnel, de même nature que celui des courroies plates mais compliqué par le fait que la courroie s'enfonce d'autant plus dans la gorge qu'elle est plus tendue, est limité par la faible extensibilité de l'armature et ne dépasse pas 0,5 à 1 %. On peut donc parler de stabilité cinématique, le rapport de la transmission n'étant pratiquement pas modifié par la charge.

Remarque : Cela favorise le bon rendement des transmissions par courroies trapézoïdales, qui dépassent souvent 97 %.

4.2.5. Durée de service. — La puissance transmissible par une courroie n'a de signification qu'associée à la durée de service, celle-ci ayant une définition statistique (comme pour les roulements à billes ; par exemple : durée atteinte ou dépassée par 90 % des roulements utilisés dans les mêmes conditions). La vie d'une courroie, exprimée en nombre de révolutions, est une fonction décroissante de la contrainte admise dans son brin moteur et, en utilisation courante, elle est comprise entre 10^7 et 10^9 révolutions. Compte tenu des vitesses linéaires et des longueurs usuelles, les durées de service correspondantes vont de 500 à 50 000 heures : la première valeur convient pour un service très intermittent (machines à laver, machines agricoles), la seconde peut être adoptée pour un service continu (ventilateurs d'aération de mine). Pour la grande majorité des applications industrielles, une durée de service de l'ordre de 8 000 heures, (soit deux années de travail en double équipe ou à quatre années en simple équipe) est acceptable.

Remarque : Il est toujours possible, en augmentant la tension initiale, de surcharger momentanément une transmission mais c'est aux dépens de la durée de vie des courroies.

4.2.6. Poulies à gorges. — Leur profil est indiqué par la recommandation internationale ISO-R-52, à laquelle les normes nationales se conforment plus ou moins strictement. Le diamètre primitif et la largeur (pour ce diamètre) de la gorge sont définis à partir de la largeur primitive de la courroie (largeur du profil au niveau de la fibre neutre de la section). L'angle de la gorge varie suivant le diamètre primitif ; les normes prévoient trois valeurs : 34°, 36° et 38°. En pratique, deux valeurs suffisent : 34° pour un diamètre primitif inférieur à 22 fois l'épaisseur de la courroie et 38° au-delà. La gorge d'une poulie doit avoir un profil constant et une surface exempte de stries d'usinage. Sur une poulie à gorges multiples, celles-ci doivent présenter un profil et une profondeur identiques pour assurer l'équi-répartition de la charge entre les courroies.

La plupart des poulies destinées aux applications industrielles est métallique, les matières plastiques n'étant utilisées que pour de très petits profils (8 mm × 5 mm et au-dessous). Pour la fonte (fig. V-63), employée dans la majorité des cas, la vitesse périphérique doit être inférieure à 35 m/s ; l'acier autorise des vitesses plus élevées. Les alliages d'aluminium, en particulier l'alpax (A S13), permettent d'obtenir des poulies légères (machine à laver, petites machines-outils).

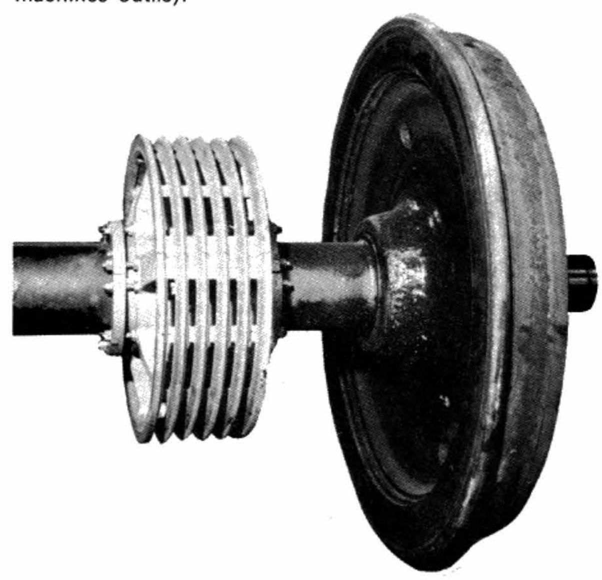


Fig. V-63 — Poulie d'essieu pour entraînement de dynamo d'éclairage sur voitures S.N.C.F. (*O.D.F.-Kléber-Colombes*)

Les poulies comportent un moyeu qui permet leur fixation sur l'arbre par un emmanchement cylindrique ou conique claveté ; l'emploi de poulies à moyeu amovible (fig. V-64) se généralise pour leurs facilités de montage, de démontage et de réemploi.

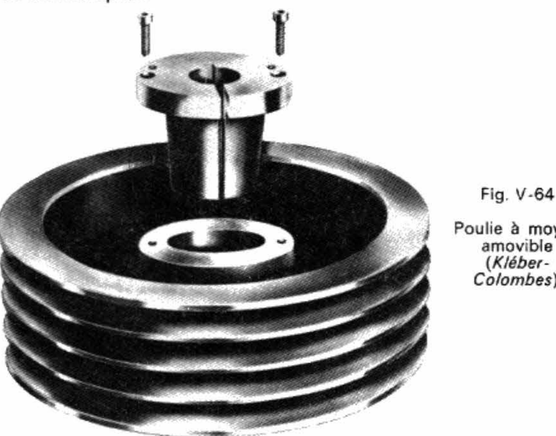


Fig. V-64

Poulie à moyeu amovible (*Kléber-Colombes*)

4.2.7. Transmissions spéciales

1° *Entre poulie plate et poulie à gorges.* — Si l'arc d'enroulement est suffisant, les gorges ne sont plus nécessaires pour obtenir l'adhérence et, pour une transmission de grand rapport à entraxe réduit, il est possible d'utiliser une grande poulie à jante plate (machines possédant un volant d'inertie de diamètre important : presses mécaniques, pompes à pistons ; fig. V-65).

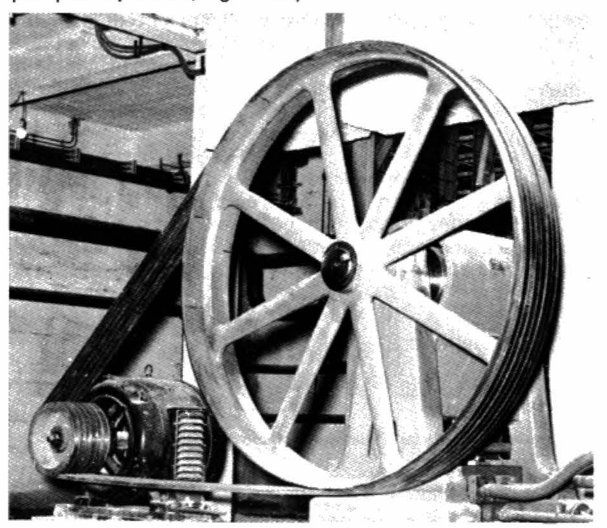


Fig. V-65 — Transmission entre poulie à gorge et poulie plate (*Kléber-Colombes*)

2° *Entre arbres orthogonaux.* — Les courroies trapézoïdales permettent de relier des arbres situés dans des plans différents ; la transmission est alors placée au voisinage de la perpendiculaire commune aux deux arbres et les poulies sont disposées de telle sorte que, au moment où les courroies quittent une poulie, elles se trouvent dans le plan médian de l'autre. Cette dissymétrie impose un sens de rotation unique. Sous réserve d'un entraxe suffisant, les deux arbres peuvent être orthogonaux et la transmission est alors dite semi-croisée (fig. V-66).

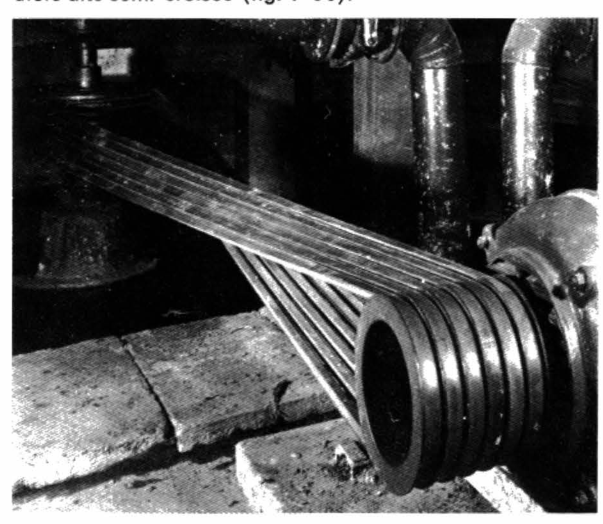


Fig. V-66

Transmission semi-croisée (*Kléber-Colombes*)

3° *Variateurs de vitesse.* — Une courroie trapézoïdale large à base encochée (capacité de tension élevée, aptitude aux petits diamètres) et deux poulies à diamètre primitif réglable constituent un variateur de vitesse simple, compact et économique. Les poulies comportent deux cônes opposés dont la distance est variable. Pour l'une, cette

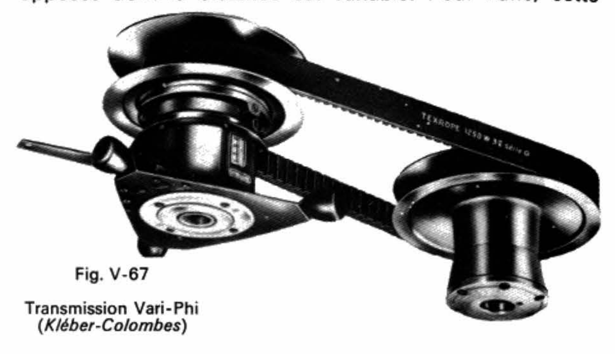


Fig. V-67

Transmission Vari-Phi (*Kléber-Colombes*)

distance est réglée, soit manuellement (fig. V-67), soit par un servomécanisme (transmission automatique de voitures par exemple). Pour l'autre, un ressort disposé dans le moyeu rapproche les cônes jusqu'à ce que la courroie soit tendue. Le réglage, absolument progressif, est possible en marche (exclusivement d'ailleurs) et permet de faire varier la vitesse de l'arbre récepteur dans le rapport de 6 à 1 et plus.

4.3. Courroies crantées. — Ces courroies engrènent par les crans de leur face interne avec des poulies cannelées (fig. V-68) : la suppression du glissement fonctionnel et celle de l'extensibilité (armature en acier) assurent un rapport de transmission rigoureusement constant (entraînement de dynamos tachymétriques d'asservissement). Leurs

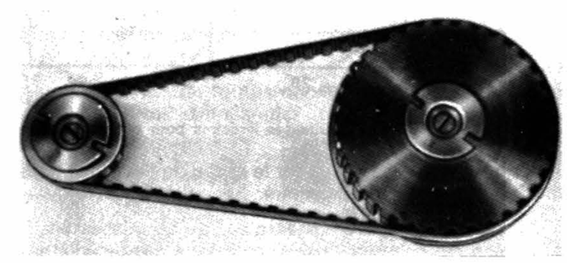


Fig. V-68 — Transmission par courroie crantée (*Synchroflex*)

autres qualités : arc d'enroulement, tension initiale et encombrement faibles, fonctionnement silencieux et à sec, endurance, permettent de les substituer aux engrenages et aux chaînes pour la commande simultanée de plusieurs arbres synchrones (distribution de moteur d'automobiles, etc.).

4.4. Convoyeurs à bande. — Le convoyeur à bande est une solution efficace et économique des problèmes de manutention, en particulier pour les produits en vrac. Ses qualités principales sont la continuité du débit, l'endurance et le fonctionnement silencieux.

4.4.1. Description. — Le schéma le plus simple (fig. V-69) comprend : un tambour d'entraînement (1) en tête du convoyeur, un tambour de renvoi (2) en queue, un tambour enrouleur (3), des stations intermédiaires de rouleaux porteurs (4), un dispositif de tension (5), un dispositif de chargement (6) et une bande transporteuse (7),

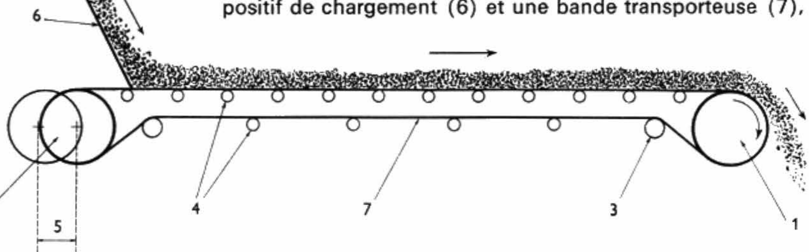


Fig. V-69



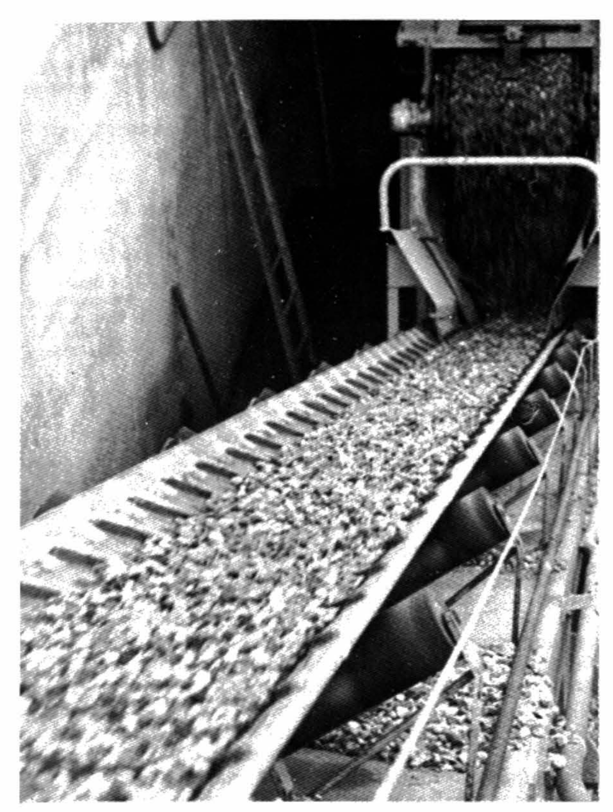


Fig. V-70 — Alimentateur à tapis et convoyeur d'évacuation (*Le Monte-Vite*)

Très souvent, la disposition des rouleaux sous le brin porteur est en auge (fig. V-70) pour augmenter la capacité sectionnelle donc le débit possible (matériau en vrac). Des pentes longitudinales sont réalisables et des dispositifs spéciaux (tasseaux, chevrons, godets; fig. V-71) permettent de fortes inclinaisons (y compris à la verticale).



Fig. V-71 — Bande équipée de tasseaux pour angle de dénivellation important (*Kléber-Colombes*)

4.4.2. Bandes transporteuses. — Les bandes transporteuses sont montées sans fin par agrafage mécanique, par vulcanisation à chaud ou par collage à froid.

1° *Armature.* — Seule à supporter l'effort de traction, elle comprend une ou plusieurs couches de tissu ou de câbles reliées par un mélange de caoutchouc ou de matière plastique souple, qui assure sa cohésion. Les éléments d'armature peuvent être textiles ou métalliques; en plus de la résistance à la traction, ils assurent la tenue de la bande vis-à-vis des chocs et des risques de déchirures.

Le coton a été longtemps le seul textile utilisé: la tension maximale en service des bandes correspondantes est de 75 N par millimètre de largeur. La rayonne permet jusqu'à 200 N/mm. Les fibres modernes (polyamide et polyester) et le câble d'acier ont conduit à des progrès spectaculaires grâce à leur grande résistance et à leur imputrescibilité. La tension en service dépasse 600 N/mm et, d'une manière générale, l'emploi de ces matériaux a permis de diminuer le nombre de « plis » nécessaires pour une tension de service donnée et de supprimer les difficultés de mise en auge des bandes à hautes résistances. L'optimum est atteint avec une seule nappe de câbles d'acier longitudinaux (fig. V-72) : il n'y a alors pratiquement plus de contraintes de flexion à l'enroulement sur les tambours, dont le diamètre peut être diminué.

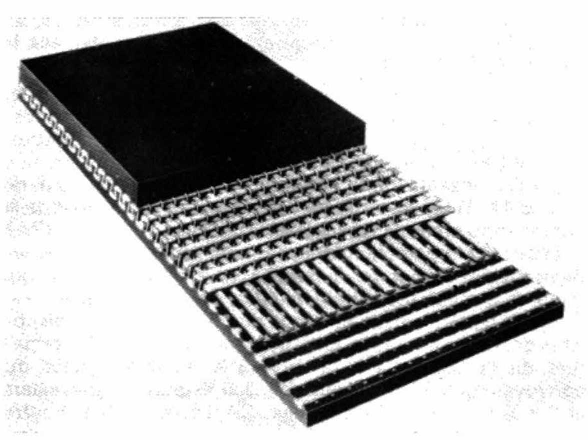


Fig. V-72 — Constitution d'une bande transporteuse (*Kléber-Colombes*)

2° *Revêtement.* — Adhérant fortement sur la carcasse, il la protège contre l'usure et les agents agressifs extérieurs (mécaniques, physiques, chimiques).

3° *Choix.* — Compte tenu des données d'un problème de manutention (nature et débit du matériau, géométrie de l'itinéraire), la préconisation d'un type de bande, du fait de l'éventail des possibilités actuelles, est un problème délicat qui est résolu par les bureaux d'étude des fabricants de bandes, en accord avec ceux des constructeurs d'infrastructures. La largeur de la bande, sa vitesse et la forme d'auge sont choisies pour obtenir le prix de revient d'exploitation minimal. Le calcul de la tension maximale de service est l'affaire de spécialistes qui disposent maintenant de méthodes éprouvées.

À partir de cet effort, qui tient compte des effets dus à l'inertie (démarrage, freinage, chocs au chargement, poids des blocs les plus lourds), le calcul des courroies plates (V. § 4.1.4) permet de déterminer l'arc d'enroulement sur le tambour moteur, la tension initiale et la puissance nécessaire à l'entraînement. Le revêtement est choisi (qualité et épaisseur) pour assurer une durée de service satisfaisante. Les largeurs de bande (de 0,3 à 2 m), leur tension maximale (de 200 à 800 N/mm) et les épaisseurs de revêtements (porteur: de 2 à 8 mm; envers: de 1 à 3 mm) sont normalisés.

4.4.3. Infrastructure. — Le choix des éléments de l'infrastructure conditionne le bon fonctionnement de l'installation, au même titre que le choix de la bande.

1° *Tête motrice.* — Suivant la valeur de l'effort tangentiel, pour assurer l'arc d'enroulement nécessaire, on utilise une tête motrice à un tambour ou à deux tambours (le deuxième est enrouleur ou moteur). Il faut parfois une

tête motrice à chaque extrémité du convoyeur, celle de la tête pouvant même avoir deux tambours moteurs. Pour obtenir une grande souplesse de fonctionnement (démarrages progressifs) on peut intercaler un coupleur hydraulique entre le moteur et le tambour d'entraînement.

2° *Tambours.* — Le choix du tambour moteur (diamètre et nature de la surface) réagit sur le type de bande préconisé. En présence d'une forte humidité (cas le plus difficile), il y a intérêt à choisir un grand diamètre et une surface garnie de caoutchouc rainuré. Les fabricants indiquent le diamètre minimal admissible pour chaque type de bande.

Pour les autres tambours (enrouleur de renvoi et d'inflexion), le diamètre peut être plus faible et il y a intérêt à avoir une surface garnie de caoutchouc quand la face porteuse de la bande se trouve à leur contact (risque de colmatage).

3° *Rouleaux porteurs.* — Leurs dimensions sont normalisées (normes AFNOR, Charbonnages de France, Sidérurgie). Le choix porte sur : leur diamètre, leur longueur, l'écartement entre jupes, leur inclinaison (angle d'auge, pinçage, etc.) et l'écartement entre rouleaux successifs. Il existe des systèmes dits *autocentreurs* qui corrigent les décentrages accidentels de la bande. Les supports de rouleaux doivent ménager à la bande un libre passage qui est défini par les normes. Pour des charges très faibles, on utilise parfois une sole continue sur laquelle se déplace la bande (fig. V-73).

4° *Dispositifs de tension.* — Les plus fréquents sont à vis, à contrepoids ou à treuil, les premiers ne convenant que pour les longueurs inférieures à 100 mètres. Leur but est de maintenir, en aval de la tête motrice, une tension suffisante pour assurer l'entraînement (valeur de t; V. § 4.1.4) et de rattraper l'allongement permanent de la bande entre stations de rouleaux. De plus, les dispositifs à contrepoids et à treuil compensent les variations d'allongement élastique en cours de marche, en particulier le mou qui apparaît en aval de l'entraînement après le démarrage.

Placés généralement en queue du transporteur, ces dispositifs doivent avoir une course adaptée à la nature de l'armature de la bande, soit environ 3 % de la longueur du convoyeur pour les polyamides, 1,5 % pour les polyesters et 0,3 % pour les câbles d'acier. Ce dernier chiffre montre l'intérêt des bandes à armature acier pour les convoyeurs de plusieurs kilomètres d'entraxes (fig. V-74).

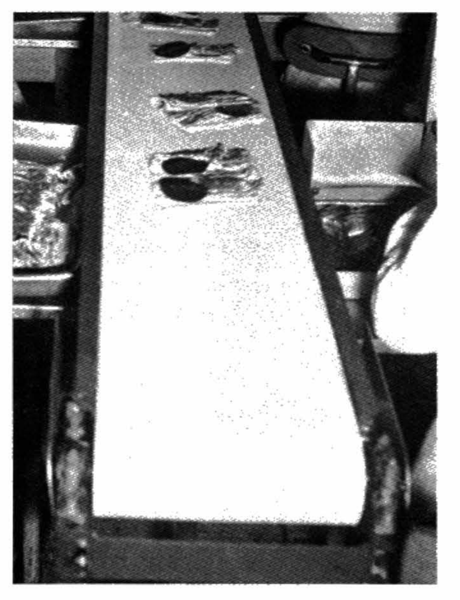


Fig. V-73

Bande transporteuse sur sole (*Kléber-Colombes*)

5° *Chargement.* — Un chargement rationnel est un facteur essentiel pour la durée de service de la bande. Il faut respecter les principes suivants : faire tomber les fines avant les blocs (grille en V), diminuer l'énergie cinétique des blocs (faible hauteur de chute, chaînes ou barres suspendues de freinage), disposer des rouleaux porteurs amortisseurs sous la zone de chargement (rouleaux à disques élastiques), centrer le matériau sur la bande (bavettes latérales ; V. fig. V-71), charger longitudinalement et donner au matériau une vitesse initiale proche de celle de la bande.

Remarque : Les problèmes de nettoyage de la bande, des tambours et des rouleaux n'ont pas de solution universelle (brosses, racleurs) ; il faut étudier chaque cas séparément.

4.4.4. Applications. — Elles sont extrêmement variées : elles vont de la manutention ultra-légère sur quelques mètres (V. fig. V-73) à la manutention lourde à longue distance (V. fig. V-74) et du transport des produits à celui des personnes (trottoir roulant).

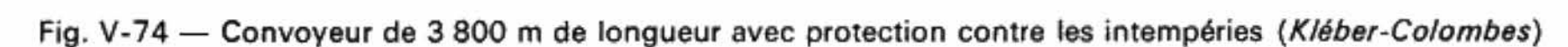
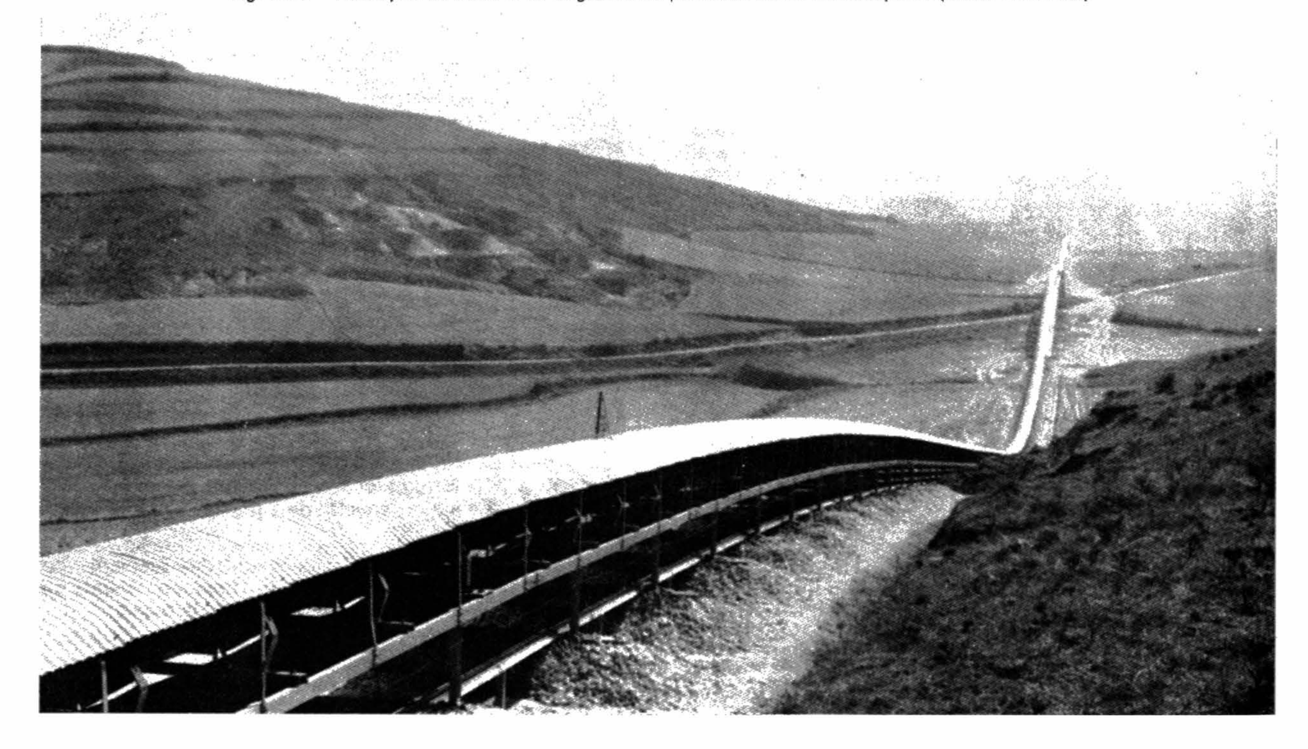


Fig. V-74 — Convoyeur de 3 800 m de longueur avec protection contre les intempéries (*Kléber-Colombes*)



5. CHAÎNES

Les chaînes sont employées pour des applications très diverses.

5.1. Chaînes de transmission. — Elles sont classées par valeur croissante de la surface de contact de leurs articulations.

5.1.1. Chaînes Galle. — Elles se composent de mailles identiques, droites ou évidées, percées de deux trous dans lesquels tourillonnent des axes ou fuseaux (fig. V-75). Ces

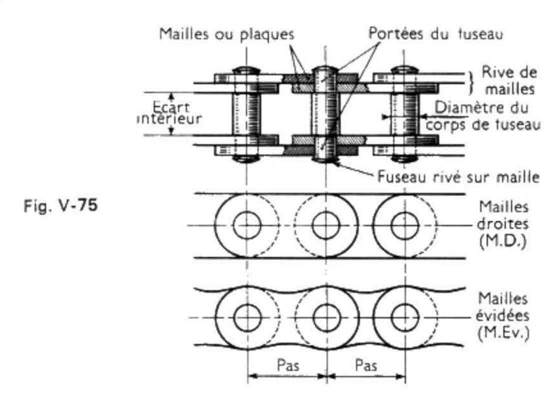


Fig. V-75

axes, dont la partie centrale (corps) maintient l'écartement entre les mailles des deux rives et engrène sur des roues dentées, sont rivés (sur mailles ou sur rondelles) ou goupillés (avec ou sans rondelle: montage et démontage facile; fig. V-76). Les chaînes dites à simples, doubles,

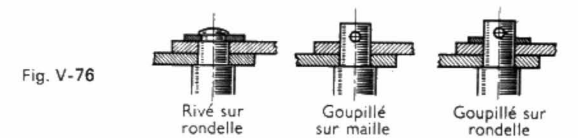


Fig. V-76

triples, ou quadruples mailles comprennent une, deux, trois ou quatre mailles par rive (fig. V-77). Suivant leur constitution, la qualité de l'acier utilisé et leurs dimensions, elles peuvent transmettre des efforts allant de dix décanewtons à plus de cent mille. Leurs surfaces d'articulation faibles (d'où des pressions élevées) limitent leur emploi à des vitesses inférieures à 30 m/mn (transmission de bancs à étirer, mouvement de va-et-vient, levage). Les caractéristiques d'une chaîne sont: le pas, le diamètre du corps de fuseau, l'écart intérieur, le nombre de mailles par rive et la section des mailles.

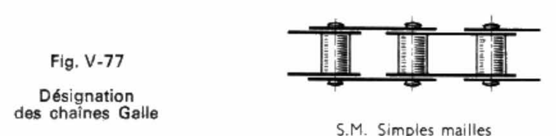


Fig. V-77

Désignation des chaînes Galle

S.M. Simples mailles — D.M. Doubles mailles — T.M. Triples mailles

5.1.2. Chaînes jointives. — Dans ces chaînes, utilisables jusqu'à des vitesses de 50 m/mn, l'axe est cylindrique (fig. V-78). Elles sont entraînées, soit par l'adhé-

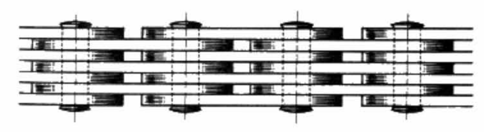
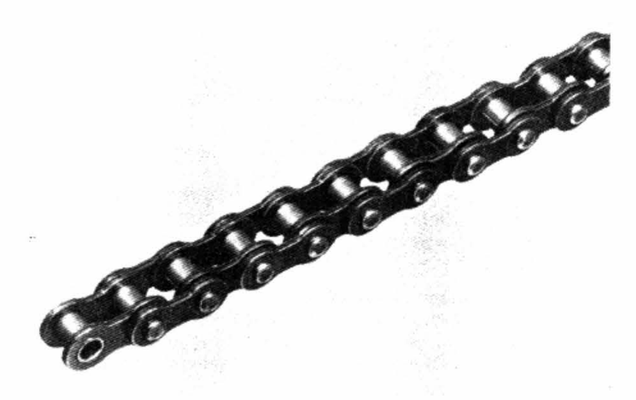


Fig. V-78 — Chaîne jointive à 3 et 4 mailles

rence des mailles évidées épousant la courbure du tambour de commande, soit par des fuseaux débordants engrénant sur des flasques taillés formant pignons (fig. V-79). Elles se caractérisent par le pas, le diamètre des axes, les nombres de mailles de deux pas consécutifs et la section des mailles. Dans les chaînes silencieuses, chaînes jointives spéciales



Chaîne de transmission simple à douilles (*Brampton-Renold*)

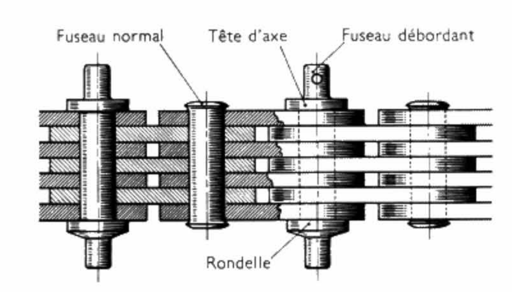


Fig. V-79 — Chaîne jointive à 3 et 4 mailles à entraînement par fuseau débordant tous les deux pas

employées uniquement pour les transmissions à grandes vitesses (500 m/mn) exigeant une grande sécurité de marche, les articulations ne servent pas directement à l'engrènement, celui-ci se faisant sur les mailles découpées en forme de dents (fig. V-80). Le nombre des mailles (donc

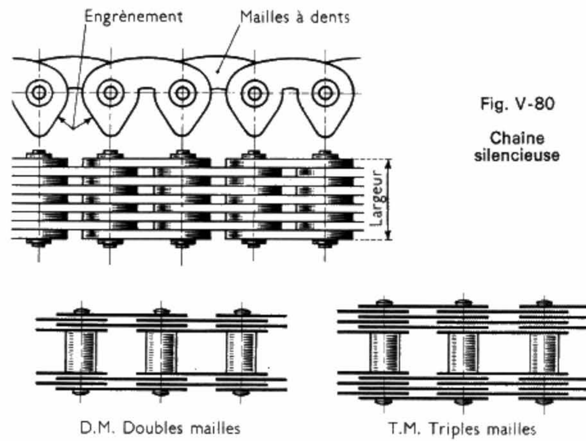


Fig. V-80

Chaîne silencieuse

la largeur de la chaîne) est fonction de la puissance à transmettre.

5.1.3. Chaînes à blocs. — Très robustes, elles comportent une maille intérieure unique, appelée *bloc* (fig. V-81), d'épaisseur au moins double de celle des mailles extérieures. Les blocs sont quelquefois munis de douilles cémentées et trempées pour diminuer les risques de grippage et augmenter la durée d'utilisation (vitesse supérieure à 60 m/mn ou manutention de matières abrasives). Pour les fortes charges,

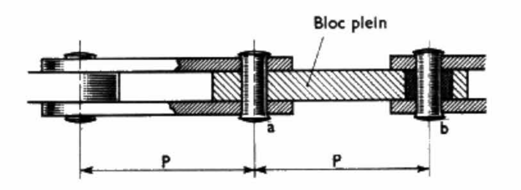


Fig. V-81

Fig. V-82

Chaîne à blocs pour banc à étirer (pas composé $p_1 + p_2$)

elles ont souvent un pas composé $p_1 + p_2$ réduit (fig. V-82) qui permet de diminuer le diamètre du tourteau d'entraînement, donc le couple, le poids et le prix du réducteur de commande.

5.1.4. Chaînes tubulaires. — Elles se caractérisent par leur articulation (fig. V-83) qui comprend un *tube* (d'où leur nom) solidaire des mailles intérieures et un *axe*, solidaire des mailles extérieures. Les tubes et les axes sont

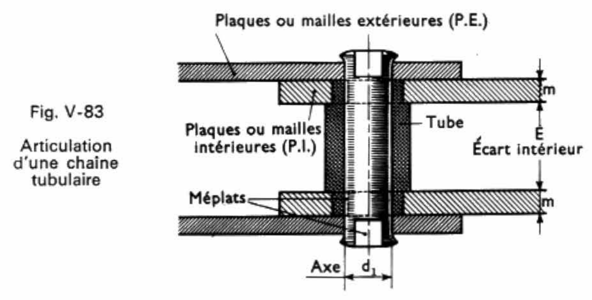


Fig. V-83

Articulation d'une chaîne tubulaire

emmanchés à la presse dans leurs mailles respectives pour former des maillons intérieurs et des maillons extérieurs. À partir d'une charge de 500 daN environ, ces emmanchements comportent des méplats pour éviter la rotation dans les mailles pendant l'enroulement sur les roues. La surface de contact importante de l'articulation procure à ces chaînes une grande résistance à l'usure. Le traitement du tube et de l'axe, cémentés et trempés, l'accroît encore. Leur pas relativement long permet d'adapter de nombreux accessoires (attaches, taquets, galets), d'où leur utilisation fréquente en manutention, cas où elles comportent souvent des galets limitant le frottement sur leur support (chaîne porteuse; fig. V-84).

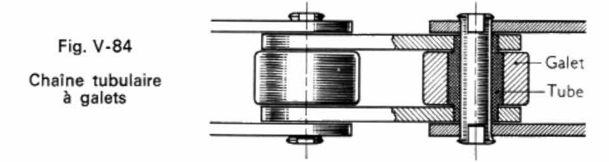


Fig. V-84

Chaîne tubulaire à galets

5.1.5. Chaînes à rouleaux. — Un galet de diamètre inférieur à la largeur des mailles, appelé *rouleau*, diminue les frottements lors de l'engrènement en roulant sur les flancs des dents de roues, ce qui est indispensable aux très grandes vitesses (fig. V-85 a et b). Généralement, les

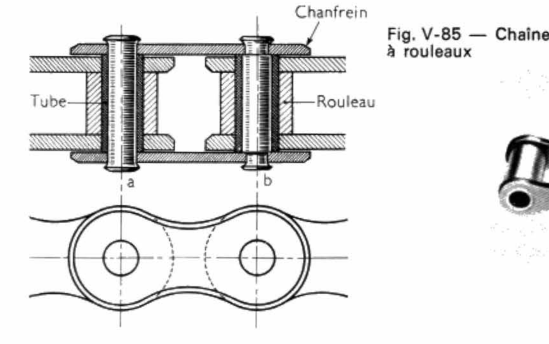
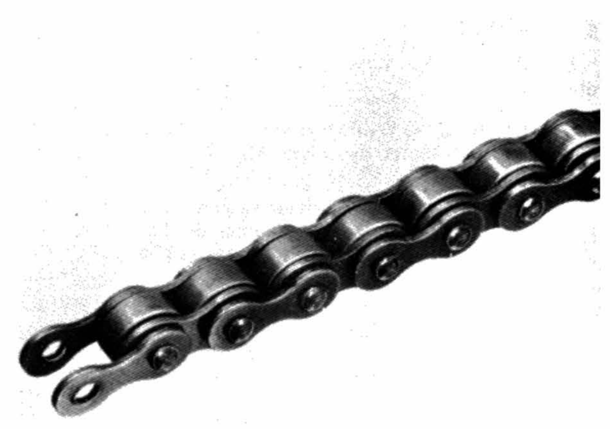


Fig. V-85 — Chaîne à rouleaux

axes sont épaulés (V. fig. V-85 b), les tubes n'ont pas d'épaulements et les mailles sont chanfreinées. La puissance transmissible par une chaîne est limitée par sa charge admissible et par la vitesse angulaire admissible de la plus petite roue, vitesse qui est inversement proportionnelle au pas. On cherche donc la plus grande charge admissible possible de la chaîne, charge qui doit être au plus égale à celle de la dent de la roue. Cette condition détermine les



Chaîne de transmission simple à rouleaux (*Brampton-Renold*)

caractéristiques (écart intérieur, diamètre de l'axe et section des mailles) pour un pas donné. Les types de chaînes les plus usuels dérivent des séries américaines ou des séries européennes (symbole A ou B, NF E 26-102). Ces chaînes à rouleaux, soignées, précises et résistantes sont exécutées avec des aciers de choix, souvent alliés et traités, et elles ont des pas courts qui permettent leur utilisation à des vitesses angulaires et linéaires élevées (6 000 tr/mn et 900 m/mn). Les transmissions constituent leur principale application. Elles sont aussi employées dans certaines manutentions nécessitant une grande vitesse linéaire ou des roues de petit diamètre.

5.2. Chaînes de manutention

5.2.1. Chaînes à axes creux. — Pour l'emploi en manutention des chaînes tubulaires et à rouleaux, on utilise des axes creux (fig. V-86 et V-87) dont l'alésage permet le passage de tiges ou de boulons servant de supports à des balancelles, taquets ou godets. De mêmes caractéristiques que les chaînes à axes pleins, elles engrènent sur les mêmes roues, mais leurs charges de rupture sont inférieures. On utilise les chaînes à rouleaux à axes creux quand les vitesses sont élevées ou si les pignons ont de petits diamètres.

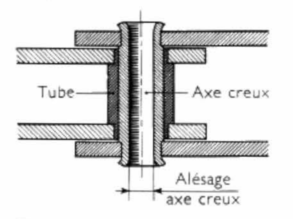


Fig. V-86 — Articulation d'une chaîne tubulaire à axe creux

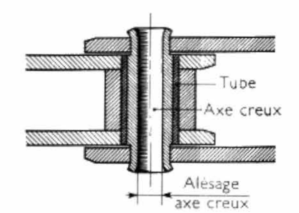
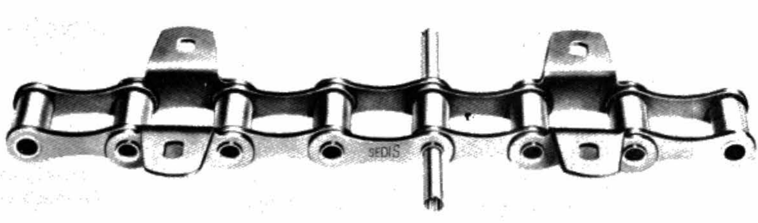


Fig. V-87 — Articulation d'une chaîne à rouleaux à axe creux



Chaîne à rouleaux à axe creux (*Bazaine-Publicité-SEDIS*)

5.2.2. Chaînes biplanaires. — Grâce à des blocs spéciaux appelés *blocs-biplans*, à deux axes orthogonaux, ces chaînes peuvent s'articuler dans deux plans perpendiculaires et permettent ainsi à certains convoyeurs de parcourir un trajet sinueux situé dans plusieurs plans. Les *tubulaires-biplanaires* comportent un maillon biplan (de pas $p = p_1 + 2\,p_2$) tous les 2 n pas et sont intermédiaires entre les tubulaires et les biplanaires, ces dernières étant consti-

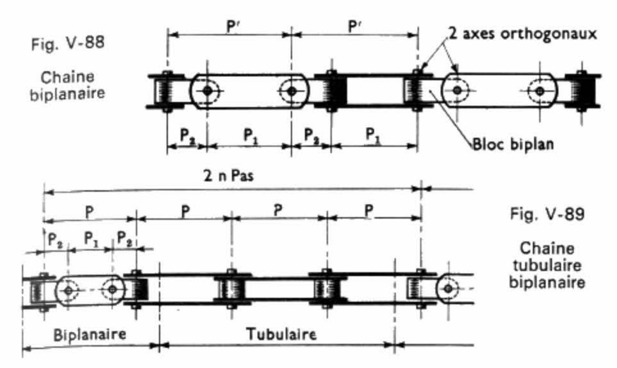


Fig. V-88 Chaine biplanaire

Fig. V-89 Chaine tubulaire biplanaire

tuées uniquement de maillons biplans de pas $p' = p_1 + p_2$ (fig. V-88 et V-89).

5.3. Levage. — En dehors de la transmission du mouvement circulaire et des manutentions légères, les chaînes sont d'un emploi fréquent pour soulever des fardeaux (appareils de levage). Dans ce domaine, les câbles métalliques supplantent les câbles en chanvre.

5.3.1. Câbles de levage

1° *Câbles en chanvre.* — Encore employés pour des appareils de levage légers (palans, moufles) et pour la constitution d'élingues, ces câbles ont une contrainte admissible en traction de 0,8 daN/mm². Pour leur calcul, il faut noter que leur section réelle est seulement de l'ordre de 80 % de la surface du cercle circonscrit.

2° *Câbles en acier.* — Employés pour leur résistance très élevée, moins souples que les précédents, ils sont composés de torons enroulés en hélice autour d'une âme en chanvre, chaque toron étant formé par des fils d'acier enroulés en hélice autour d'un fil central. La résistance à la rupture de ces fils est de 120 à 150 daN/mm²; pour de grandes hauteurs (mines) et afin de réduire le poids, elle dépasse même 200 daN/mm². Allant de 0,4 à 2 mm, le diamètre des fils dépend du milieu dans lequel fonctionne le câble (fils plus gros en milieu humide pour tenir compte de l'action de la rouille) et du diamètre d'enroulement D sur les poulies et le tambour; en général, on adopte 0,003 D pour une commande manuelle et 0,0015 D pour une commande mécanique. Pour les câbles qui ne sont pas soumis à l'enroulement (gréement des navires) on utilise une âme métallique. Pour certaines applications (ascenseurs), on emploie souvent des câbles plats formés par la juxtaposition de plusieurs câbles identiques. Les règlements actuels imposent un coefficient de sécurité, rapport de la charge minimale de rupture du câble garantie par le fabricant et de sa charge admissible en service, de huit pour les appareils de levage (grues, palans, ponts roulants), de neuf pour les ascenseurs et de dix pour les appareils d'extraction (cages de mines).

3° *Poulies et tambours pour câbles.* — Il faut remarquer que la résistance à l'enroulement est d'autant plus grande que le diamètre de poulie ou de tambour est plus petit.

Les poulies comportent une gorge circulaire (de rayon égal à celui du câble) dont les flancs ne doivent pas pincer le câble. En général, elles sont folles sur leur axe qui est supporté par une chape (fig. V-90). Plusieurs poulies folles montées côte à côte sur un seul axe constituent une moufle: deux moufles identiques à n poulies, sur lesquelles circule un câble unique, permettent de soulever une charge égale à $2n$ fois la charge admissible du câble employé (fig. V-91). Les poulies de petites dimensions sont pleines; plus grandes, elles ont des bras. Sauf exception, les poulies n'assurent que le guidage des câbles.

L'entraînement des câbles se fait par enroulement (plusieurs tours: V. § 4.1.4) sur un tambour tournant, généralement en fonte, commandé par une couronne dentée boulonnée à l'une des extrémités (disposition qui évite de soumettre l'arbre à la torsion). Si l'extrémité du câble est fixée au tambour, la longueur l de celui-ci est fonction

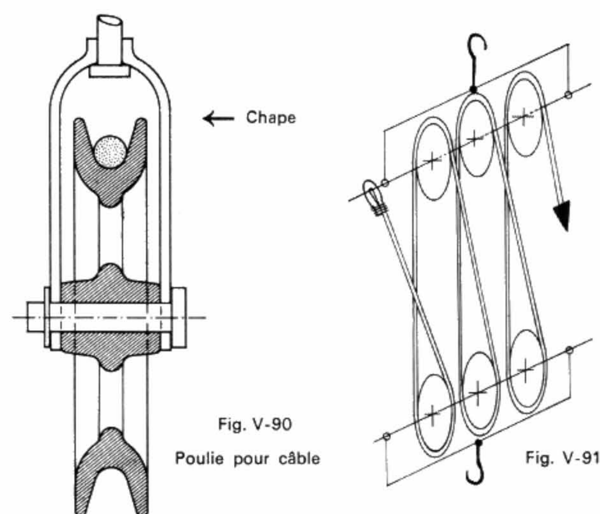


Fig. V-90 Poulie pour câble

Fig. V-91

de la longueur du câble à enrouler: $l = (\frac{L}{\pi D} + 4)\,d$, avec: D, diamètre du tambour; d et L, diamètre et longueur du câble. Il est bon qu'en fin de course, il reste sur le tambour deux tours de câble non déroulé dont l'adhérence évite toute traction sur l'attache du câble. Ce type de tambour, le plus fréquent, comporte pour les câbles métalliques une gorge hélicoïdale qui évite les chevauchements à l'enroulement.

5.3.2. Chaînes de levage. — Pour les très fortes charges on remplace souvent les câbles par les chaînes aptes à s'enrouler sans risque de rupture sur de très petits diamètres (limitant ainsi le couple et les dimensions du réducteur de commande).

1° *Chaînes articulées.* — Parmi toutes les chaînes précédentes, les chaînes Galle et les chaînes jointives sont utilisées pour des engins de levage puissants. Elles se terminent par des maillons d'attache spéciaux (fig. V-92). La contrainte admissible est de 12 daN/mm². Les dents des roues assurent le guidage (roues folles), ou le guidage et l'entraînement (roues de manœuvre); leur nombre est au moins égal à dix.

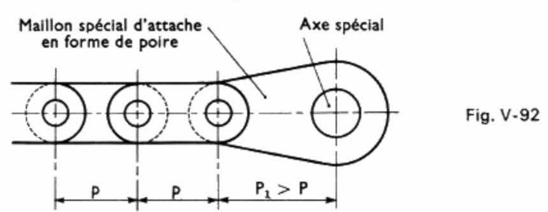


Fig. V-92

2° *Chaînes à maillons.* — Les plus courantes sont les chaînes à maillons soudés en acier Martin extra-doux (soudure électrique par résistance) dont la charge admissible en service correspond à une contrainte de 4 à 6 daN/mm². La chaîne à maillons courts (fig. V-93), ou

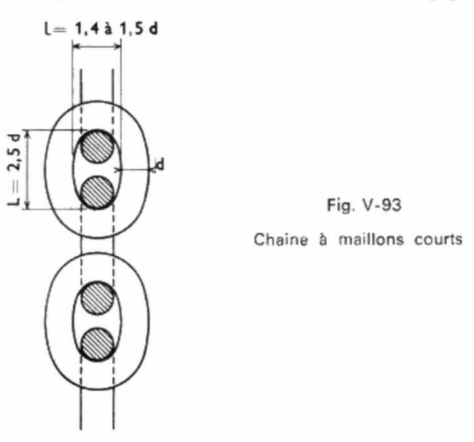


Fig. V-93

Chaine à maillons courts

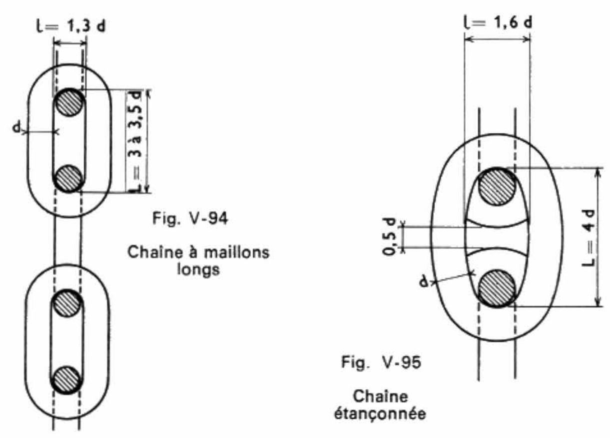


Fig. V-94
Chaîne à maillons longs

Fig. V-95
Chaîne étançonnée

chaîne câble, est intéressante pour l'enroulement sur un barbotin (ou sur un tambour) de petit diamètre : ses maillons à plat fléchissent peu. La chaîne à maillons longs (fig. V-94), employée principalement pour les attelages s'utilise lorsque le diamètre d'enroulement est assez grand ; sinon, il faut l'employer sur des noix. La chaîne à maillons étançonnés (fig. V-95), dont l'étançon central augmente la résistance, ne sert que dans la marine pour les fortes charges (chaîne d'ancre).

Les poulies de guidage, appelées *barbotins*, comportent une rainure circulaire, la chaîne reposant sur la jante par ses maillons à plat (fig. V-96). Les poulies d'entraînement

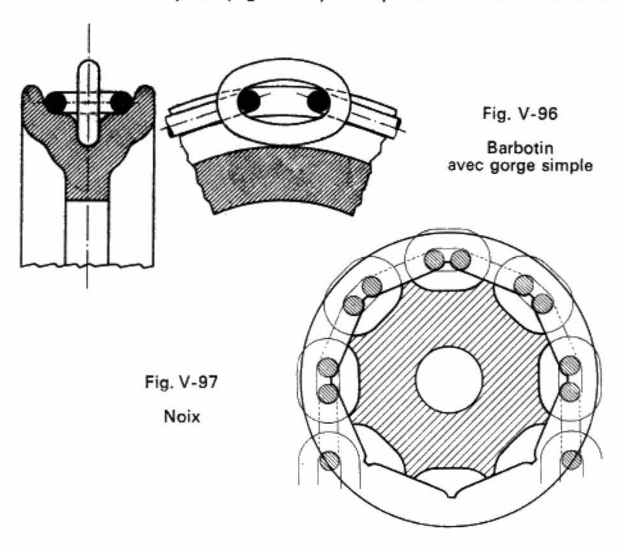


Fig. V-96
Barbotin avec gorge simple

Fig. V-97
Noix

(fig. V-97), appelées noix, comportent des alvéoles dans lesquels les maillons s'encastrent de façon qu'ils soient toujours soumis à la traction et jamais à la flexion. Elles s'exécutent avec au moins cinq empreintes et le diamètre est supérieur à trente fois le diamètre de fil du maillon. Alors que les barbotins peuvent être exécutés en tôle emboutie, les noix sont toujours moulées (fonte ou acier). Les tambours, de forme générale identique aux tambours pour câble, ont une gorge hélicoïdale étroite comme les barbotins (fig. V-98).

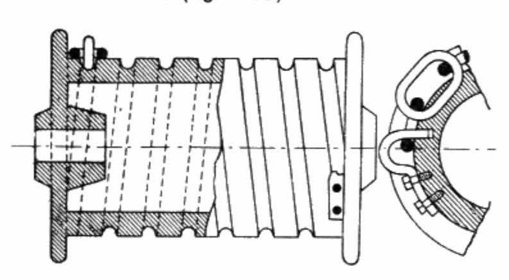


Fig. V-98 — Tambour pour chaîne

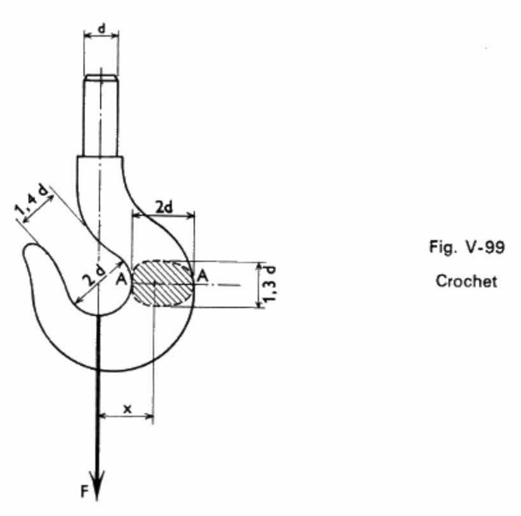


Fig. V-99
Crochet

5.3.3. Crochets de levage. — Le câble (ou la chaîne) d'un appareil de levage supporte un crochet en acier forgé qui doit toujours être monté oscillant pour que la charge soit dirigée suivant son axe. Sa forme (d'égale résistance, fig. V-99) est normalisée et ses dimensions principales dépendent du diamètre *d*. Celui-ci est calculé à l'extension, compte tenu du filetage (contrainte admissible : 4 daN/mm²) dans le cas de l'acier doux). On vérifie ensuite la section *AA* à la flexion (moment fléchissant *Fx*). Si la charge doit tourner, on utilise un crochet tournant (fig. V-100). Pour de très fortes charges, on prévoit un crochet double dit *crochet à ancre* (fig. V-101).

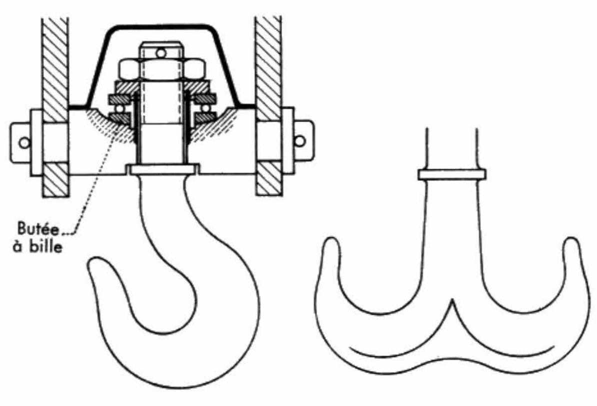


Fig. V-100 — Montage d'un crochet à roulement

Fig. V-101 — Crochet à ancre

6. ROUES DE FRICTION

6.1. Principe. — Alors que dans les commandes par poulies la force est transmise par le frottement de la courroie (ou du câble) sur la jante, on peut réaliser des transmissions sans courroie par simple frottement des jantes des poulies entre elles, sous réserve que les axes des poulies soient très rapprochés. Dans ce cas, les poulies tournent en sens inverse, à la façon des engrenages (fig. V-102). En général, l'une des roues est garnie d'un matériau de frottement, l'augmentation du coefficient de frottement ainsi obtenue accroissant le couple transmissible.

En effet, la force transmissible a pour valeur :

$$F \leqslant f.P$$

P étant l'effort qui applique les roues l'une sur l'autre et *f* le coefficient de frottement qui dépend du couple de matériaux en contact (fonte sur fonte : $f = 0{,}1$ à 0,15 ; fonte sur papier : 0,15 à 0,2 ; fonte sur cuir : 0,2 à 0,3 ; fonte sur bois ou sur ferodo : 0,3 à 0,4 ; fonte sur caoutchouc : 0,4 à 0,6). On admet, en général, pour la force *F*, 5 daN par centimètre de longueur de la génératrice de contact.

Les roues de friction, caractérisées par leur marche silencieuse, ont l'avantage, du fait de leur principe, d'être des

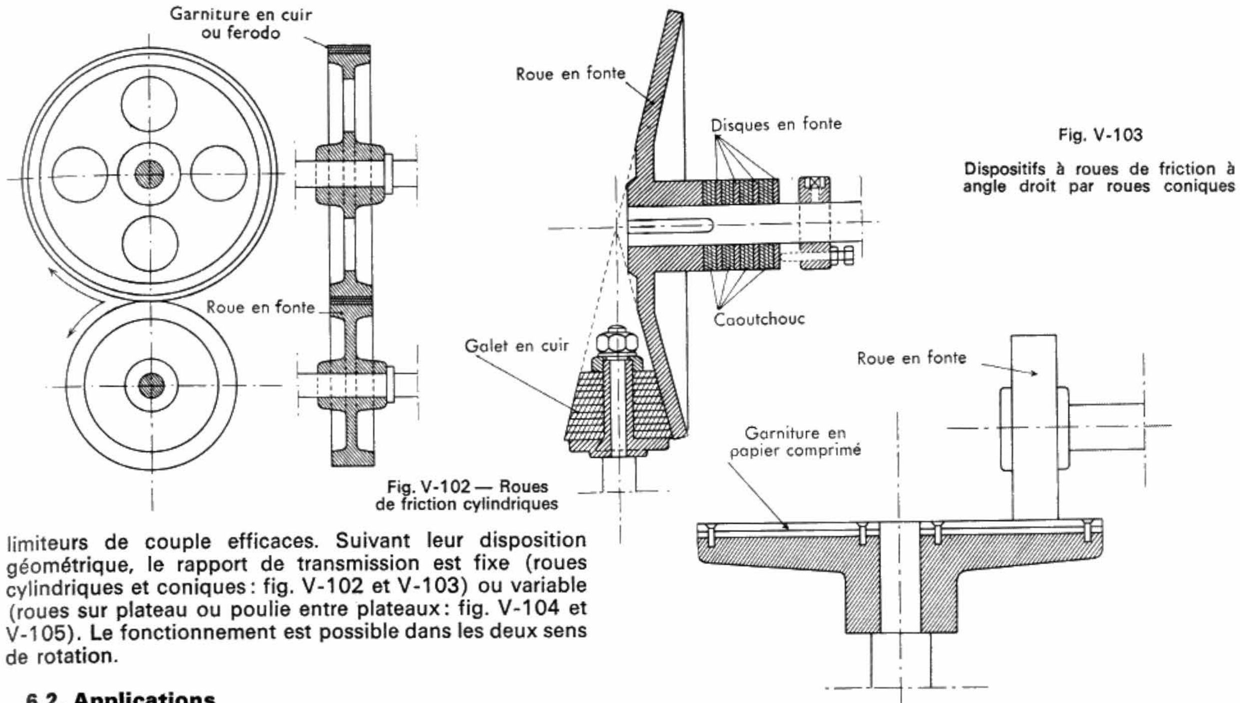


Fig. V-102 — Roues de friction cylindriques

Fig. V-103

Dispositifs à roues de friction à angle droit par roues coniques

Fig. V-104 — Dispositif à roues de friction à angle droit par roue plane et roue cylindrique

limiteurs de couple efficaces. Suivant leur disposition géométrique, le rapport de transmission est fixe (roues cylindriques et coniques : fig. V-102 et V-103) ou variable (roues sur plateau ou poulie entre plateaux : fig. V-104 et V-105). Le fonctionnement est possible dans les deux sens de rotation.

6.2. Applications

6.2.1. Vitesse constante. — Les roues cylindriques sont utilisées pour l'entraînement de volants (presses et cisailles mécaniques).

6.2.2. Vitesse variable

1° *Système à un plateau.* — Le réglage de la distance entre roue et axe du plateau (V. fig. V-104) permet de constituer des variateurs de vitesses très légers, extrêmement simples et de rendement élevé. Pour des petites puissances (1 à 10 kW), il conduit à des réalisations mécaniques assez lourdes et encombrantes, l'effort *P* sur le plateau exigeant des paliers largement dimensionnés. L'emploi de deux plateaux avec une roue commune permet d'obtenir une grande plage de réglage (1 à 10) dans un encombrement acceptable et d'avoir des arbres entrée et sortie parallèles (fig. V-106 : variateur F.U. où le rapport des vitesses des arbres (1) et (2) dépend de la position du galet *G*).

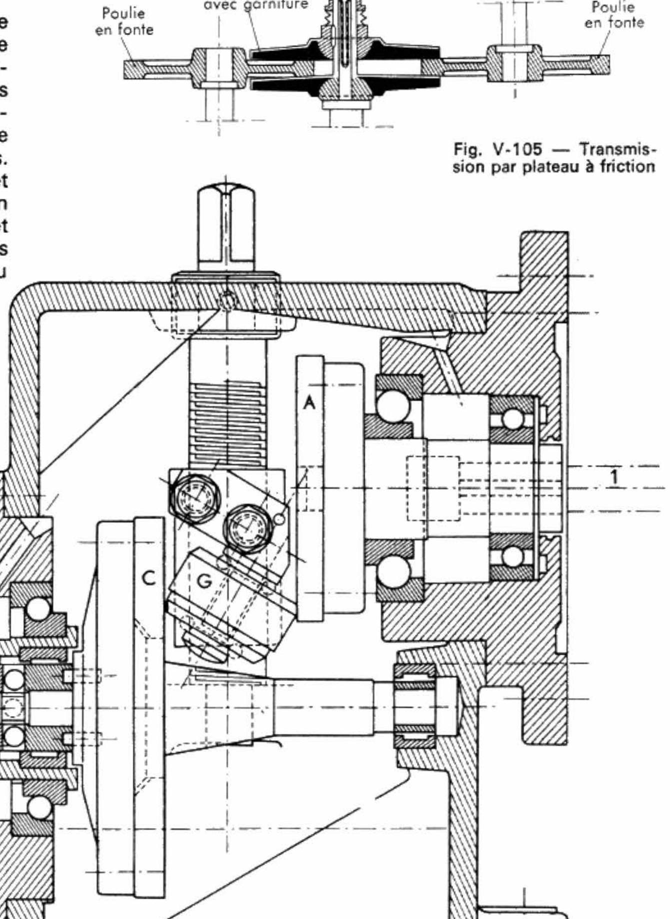


Fig. V-105 — Transmission par plateau à friction

Fig. V-106

Variateur de vitesse F.U.

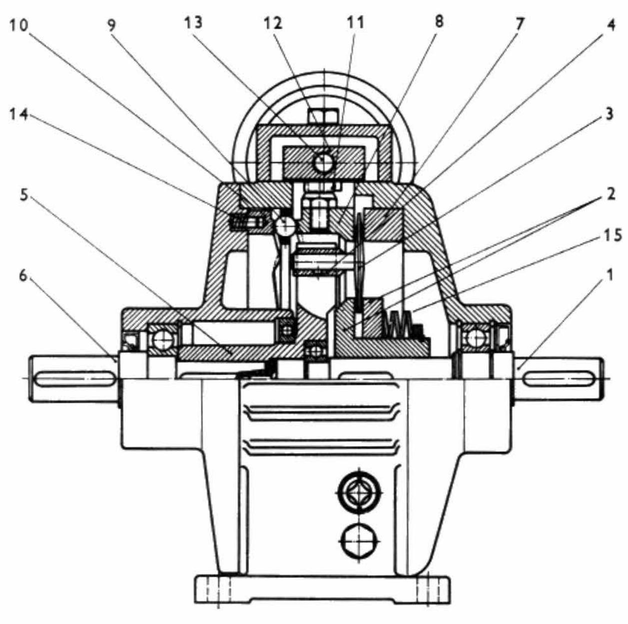


Fig. V-107 — Variateur Disco

2° *Système à deux plateaux.* — La variation de la distance des arbres conduit à des réalisations encombrantes (V. fig. V-107) et le rendement ne dépasse pas 60 %. Néanmoins, pour des puissances moyennes (1 à 40 kW), l'effort P n'agissant pas sur les paliers, on peut réaliser des variateurs légers et compacts grâce à l'utilisation d'une disposition cinématique à satellites. La figure V-107 représente un variateur Disco où le rapport des vitesses des planétaires (2) et (5) dépend de la position des satellites biconiques (4), elle-même réglée par l'écartement des anneaux extérieurs (7) et (8). La plage de réglage obtenue est moyenne (1 à 6).

7. ENGRENAGE

7.1. Généralités. — Les engrenages sont conçus en vue de la transmission de puissance entre deux arbres rapprochés dont le rapport des vitesses doit être rigoureux et constant; les deux arbres peuvent être parallèles, concourants, orthogonaux, ou même quelconques. Les premiers engrenages construits par l'homme, très rudimentaires, étaient constitués d'une jante sur laquelle étaient placées des fiches de bois qui jouaient le rôle de dents. Un abîme les sépare des engrenages modernes dont la fabrication nécessite une expérience et des connaissances scientifiques très étendues. L'accroissement des vitesses et des charges impose une maîtrise de la métallurgie des dentures. La nécessité d'un fonctionnement silencieux et d'une usure minimale rend nécessaire l'étude de la correction des profils pour équilibrer les glissements spécifiques entre surfaces conjuguées et éviter les interférences. Enfin, ces profils doivent être usinés avec une grande précision et nécessitent des machines-outils spécialement mises au point à cet effet. De nouveaux problèmes se posent à chaque progrès technique : il en a été ainsi pour les ponts arrière hypoïdes, pour les cages à pignons des trains de laminoirs modernes à grande vitesse et, plus récemment, pour les roues dentées de réacteurs tournant à 30 000 tr/mn.

Cependant, les immenses progrès réalisés dans la fabrication des engrenages n'ont été profitables que grâce à l'amélioration continuelle des lubrifiants. En effet, le film d'huile interposé entre les dentures en contact réduit l'usure, la puissance absorbée, l'échauffement et le bruit dû à l'engrènement. Les engrenages dérivent des roues de friction par adjonction de dents interdisant tout glissement entre les roues, d'où un rapport de vitesses constant et la possibilité de transmettre des couples très importants. Deux roues dentées engrenant ensemble constituent un engrenage : la plus petite est le pignon, l'autre la roue; une roue de rayon infini est une crémaillère.

Les deux roues sont dites conjuguées et les éléments géométriques des roues de friction donnant le même rapport de vitesses sont qualifiés du terme *primitif :* cylindres ou cônes primitifs, cercles primitifs, diamètres primitifs; les cylindres ou cônes primitifs de deux roues d'engrenage sont donc toujours tangents l'un à l'autre (V. fig. V-117, 118, 128, 132 et 133).

7.1.1. Rapport des vitesses. — Au point de contact des cylindres ou cônes primitifs, il passe, dans le même temps, le même nombre de dents de chacune des roues, puisque tout glissement est impossible. Soit z_1 et z_2 les nombres de dents, N_1 et N_2 les nombres de tours par minute des deux roues. En une minute, il passe au point de contact $N_1 . z_1$ dents de l'une des roues et $N_2 . z_2$ dents de l'autre roue, d'où :

$$N_1 . z_1 = N_2 . z_2 \text{ ou : } \frac{N_2}{N_1} = \frac{z_1}{z_2}$$

Le rapport des vitesses est donc égal au rapport inverse des nombres de dents. Cela est vrai quel que soit le type d'engrenage.

Par ailleurs, puisque les cylindres ou cônes primitifs sont toujours tangents et que tout glissement est impossible, le rapport des vitesses est aussi égal au rapport inverse des diamètres primitifs, d'où :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

On en déduit que les diamètres primitifs de deux roues conjuguées sont proportionnels aux nombres de dents de ces roues.

7.1.2. Classification

1° *D'après la position relative des axes :*
- axes parallèles : engrenage parallèle ou cylindrique,
- axes concourants : engrenage concourant ou conique,
- axes non dans le même plan : engrenage gauche.

2° *D'après la forme de la denture :*
- denture droite,
- denture hélicoïdale,
- denture spirale,
- roue et vis sans fin.

7.2. Engrenages cylindriques à denture droite. — Ces engrenages sont les plus simples et les plus répandus (V. fig. V-118) : leurs surfaces primitives sont des cylindres parallèles tangents (V. fig. V-117) et le contact entre les dents se fait suivant une ligne droite variable parallèle aux arbres (V. fig. V-112).

7.2.1. Définitions relatives à la denture. — La forme des dents d'engrenage est conçue en fonction des propriétés cinématiques recherchées pour la transmission, et les termes définissant les différentes parties de la denture sont normalisés (fig. V-108 a et V-108 b). On distingue : le cercle extérieur ou de tête, le cercle à fond de dent ou de pied, et le cercle primitif. À ces cercles

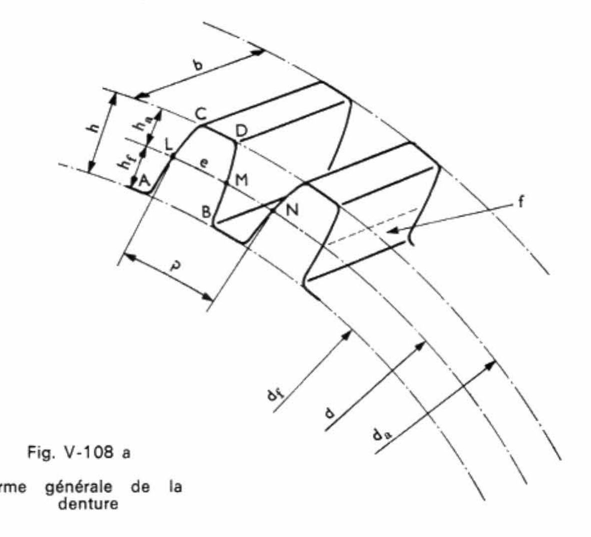


Fig. V-108 a

Forme générale de la denture

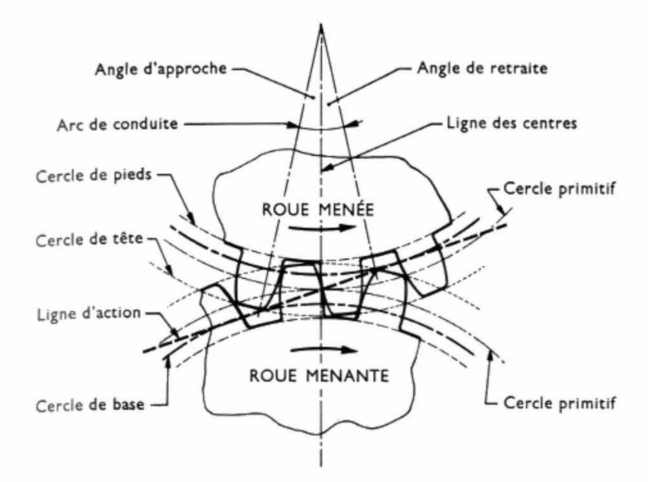


Fig. V-108 b — Éléments d'une denture (profil à développante de cercle) (*Mobil Oil*)

correspondent les diamètres : d_a, diamètre extérieur ou de tête, d_f, diamètre intérieur ou de pied et d, diamètre primitif.

La dent est définie par le pied ou racine (AB), le sommet (CD), la partie latérale ou flanc (f) comprise entre le cercle de pied et le cercle de tête. Elle est caractérisée par sa hauteur h et son épaisseur $e = \widehat{LM}$. La distance h_f entre le cercle intérieur et le cercle primitif est appelée *creux* de dent et la partie h_a comprise entre le cercle primitif et le cercle extérieur est appelée saillie de la dent. La longueur de la dent b correspond à la largeur de l'engrenage ; elle est aussi appelée largeur de denture.

L'arc $\widehat{LMN}$ est appelé pas p de la denture. On l'appelle également pas circonférentiel ; sa valeur est $p = \frac{\pi d}{z}$, z étant le nombre de dents. Pour simplifier les calculs, on détermine le nombre de dents par rapport au diamètre et non à la longueur de la circonférence primitive ; on définit ainsi le pas diamétral ou module par le quotient :

$$m = \frac{d}{z}$$

d'où :

$$p = \frac{\pi d}{z} = \pi m$$

Les valeurs de m sont normalisées et les différentes caractéristiques définissant la dent sont liées par les relations suivantes dans le cas des dentures normales (NF E 23-011) : $p = \pi m$; $d = m.z$; $h_a = m$; $d_a = d + 2\,m$; $h_g = 1{,}25\,m$; $h = 2{,}25\,m$; $e = \frac{p}{2} = \frac{\pi m}{2} = 1{,}57\,m$; $d_f = d = 2{,}5\,m$; $b = k.m$.

On adopte généralement :

— $k = 4$ à 6 pour faibles vitesses, montage sans précision (roues d'appareils de levage) et charges modérées ;
— $k = 8$ à 10 en construction mécanique courante avec engrenages taillés et charges moyennes ;
— $k = 12$ à 16 pour très grandes vitesses (engrenages à dentures rectifiées), faible module ou charges importantes.

Remarque : Lorsque le pouce est pris comme unité de mesure, les engrenages sont définis par le diamètre Pitch qui est égal au quotient Δ du nombre de dents par le diamètre primitif exprimé en pouces :

$$\Delta = \frac{z}{d} \text{ avec } d \text{ en pouces}$$

soit :

$$\Delta = \frac{25{,}4\,z}{d} \text{ avec } d \text{ en millimètres}$$

ou :

$$\Delta = \frac{25{,}4\,z}{m.z} = \frac{25{,}4}{m}$$

7.2.2. Profil des dents. — Les flancs de la dent sont définis par les courbes AC et BD appelés profils (V. fig. V-108 a). L'un des ces profils appuie, pendant le fonctionnement, sur le profil correspondant de la deuxième roue, appelé profil conjugué. Soit (fig. V-109) deux cercles primitifs C et C_1, tournant avec les vitesses angulaires ω et ω_1, et des profils E et E_1 liés au mouvement respectif de ces deux cercles et en contact pendant la rotation. La courbe E_1 étant tangente à toutes les positions de E est l'enveloppe de celle-ci dans le mouvement de C sur C_1. De même, si l'on considère le mouvement de C_1 sur C, E devient l'enveloppe de E_1. Ces deux courbes, enveloppes l'une de l'autre dans l'un ou l'autre des mouvements, sont dites profils conjugués, et leur normale commune passe par le centre instantané de rotation I.

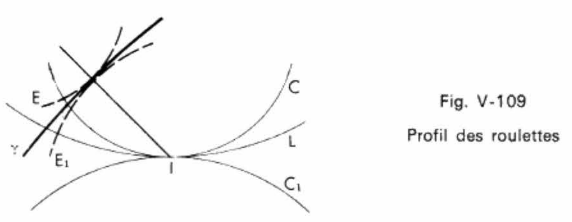


Fig. V-109
Profil des roulettes

Pour obtenir un profil conjugué E_1 lié à un cercle C_1, étant donné un profil E lié à un cercle C, il suffit de chercher l'enveloppe de E quand C roule sur C_1. On peut utiliser, soit la méthode des enveloppes, soit la méthode des roulettes. Cette dernière, la plus employée, consiste à associer aux cercles primitifs C et C_1 un cercle L, de centre fixe, qui leur est tangent en I. Soit γ une courbe liée au cercle L ; dans le roulement de L sur C, γ aura une enveloppe E ; de même, dans le roulement de L sur C_1, l'enveloppe de γ sera E_1. La normale menée de I sur γ rencontrera cette courbe au point de contact de E et E_1 qui seront des profils conjugués. Si la courbe γ est réduite à un point du cercle L, les courbes E et E_1 détermineront des profils épicycloïdaux. En revanche si γ est une droite, L étant également une droite, on obtiendra des profils en développante de cercle.

1° *Profils épicycloïdaux.* — Leur utilisation tend à disparaître car ils exigent un entraxe rigoureux et ils sont difficiles à obtenir par génération. Ils conviennent pour de faibles nombres de dents et trouvent leur application dans certains engrenages d'appareils de levage. Ils ne font l'objet d'aucune normalisation.

2° *Profil en développante de cercle.* — Facile à engendrer avec les machines à tailler actuelles, il est pratiquement le seul employé pour les dents des engrenages utilisés en construction mécanique. De plus, ses conditions d'engrènement restent correctes, malgré de petites variations de l'entraxe des roues. La développante de cercle est obtenue par le roulement d'une droite DSD' sur deux cercles Δ et Δ' appelés cercles de base et respectivement concentriques aux cercles primitifs C et C' de centre O et O' (fig. V-110). Le point de contact S décrit la développante E pour le cercle C, et E' pour le cercle C', ces deux profils

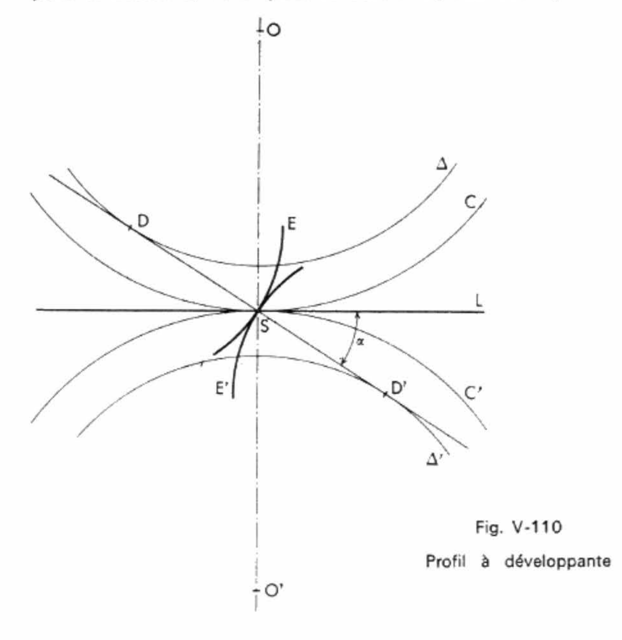


Fig. V-110
Profil à développante

restant tangents dans leur roulement. La perpendiculaire en S à la droite DSD' correspond à la courbe γ et le cercle L est ramené à une droite. La droite DSD' est appelée droite d'engrènement ou ligne d'action car le point de contact des profils E et E' dans leur roulement se trouve toujours sur cette droite. L'angle α est appelé *angle de pression* et sa valeur normalisée est de 20° ; on adopte également 14°30 et dans certains cas 22°. Lorsque l'angle de pression augmente, la tête de la dent diminue et celle-ci devient fragile.

7.2.3. Déplacement relatif des dentures. — Les deux profils conjugués étant des courbes enveloppes, ils roulent en glissant l'un sur l'autre. Lorsque le point de contact se trouve au point de tangence des cercles primitifs, le mouvement relatif est un roulement sans glissement puisque ce point est le centre instantané de rotation. En avant et en arrière de cette position, un glissement s'ajoute au roulement et il change de sens lorsque le point de contact passe par le point de tangence des cercles primitifs. En deçà, les dentures s'approchent l'une de l'autre avec une vitesse qui diminue jusqu'au cercle primitif et s'y annule : le glissement est dirigé vers le cercle primitif sur la dent menée et en sens inverse sur la dent menante (fig. V-111). Au-delà, les dentures s'éloignent avec une vitesse qui croît jusqu'au moment où le contact cesse : comme le glissement a changé de sens au cercle primitif, il est encore dirigé vers celui-ci sur la dent menée et est en sens inverse sur la dent menante.

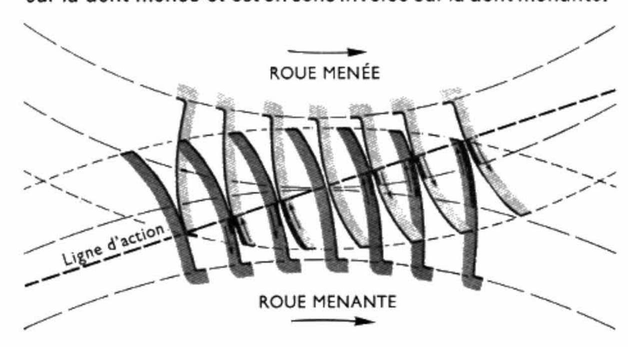


Fig. V-111 — Glissement relatif des dentures au cours de l'engrènement

De ce processus de déplacement, il est utile de retenir trois points particuliers. Le glissement est constamment dirigé vers le cercle primitif sur la dent menée et à l'opposé sur la dent menante. Le roulement et le glissement ont même sens sur la saillie des dents, alors qu'ils ont des sens opposés sur les creux. Enfin, si le glissement a la même valeur relative pour les deux portions de profils conjugués en contact pendant un temps donné, il ne s'exerce pas sur la même longueur pour chacune d'elles et aura un effet plus prononcé sur la portion la moins longue, c'est-à-dire celle située au-dessous du cercle primitif, qu'il s'agisse du pignon ou de la roue.

Le glissement spécifique est le rapport de la vitesse de glissement à la vitesse de roulement.

7.2.4. Surface de contact. — Sous l'effet de la charge, les dents se déforment élastiquement et la ligne théorique de contact (fig. V-112) est remplacée par une surface dont

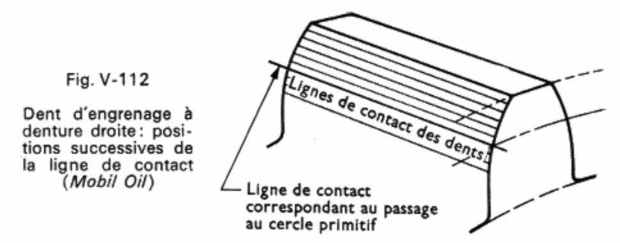


Fig. V-112

Dent d'engrenage à denture droite : positions successives de la ligne de contact (*Mobil Oil*)

les dimensions dépendent de la charge, du module d'élasticité des métaux, de la largeur des dents et du rayon de courbure relatif des profils au point de contact (formule de Hertz : V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 11). Cette surface, variable au cours de l'engrènement, est toujours très petite et la pression de contact est très élevée.

Sur les dentures des ponts arrière d'automobiles, par exemple, on a pu déterminer que cette pression varie de 50 à plus de 300 daN/mm² pendant l'engrènement.

7.2.5. Conditions du graissage. — La lubrification des dentures présente certaines analogies avec celle des paliers lisses. Dans l'un et l'autre cas, en effet, le graissage est rendu possible par le mouvement des surfaces entre lesquelles se forme un coin d'huile. Toutefois les progrès réalisés dans les études théoriques, tant analytiques qu'expérimentales, sur la formation du coin d'huile dans les contacts chargés (engrenages, cames, etc.) conduisent à réviser certaines notions.

On a longtemps cru que la formation du coin d'huile dépendait à la fois du glissement et du roulement intervenant dans le déplacement relatif des dentures lors de leur engrènement. La théorie alors admise était la suivante : l'huile est constamment entraînée vers la zone de pression par le glissement de la dent menée ou de la dent menante.

Par ailleurs, le mouvement de roulement tend à introduire l'huile dans cette zone, le glissement et le roulement se complétant ainsi pour la formation du coin d'huile. Leur effet combiné est plus grand au début et à la fin du contact ; c'est donc dans ces zones que les conditions sont les plus favorables. Au contraire, au niveau du cercle primitif, cet effet est réduit puisque, pratiquement, seul le roulement existe. Cette théorie laissait apparaître, par analogie avec le cas des paliers lisses, la prépondérance du glissement et portait à en déduire que l'épaisseur du film d'huile est très faible au cercle primitif.

Or, les travaux théoriques importants effectués surtout depuis 1950 ont abouti à des conclusions nettement opposées. Ils ont comporté des essais systématiques et des méthodes originales ont été employées pour mettre en évidence la présence et l'épaisseur du film d'huile : mesure du transfert de métal d'une roue, préalablement rendue radioactive, à l'autre roue non traitée (ce transfert n'est possible qu'en cas d'absence du film d'huile) et mesure de la tension de claquage du film, celle-ci étant en relation directe avec son épaisseur. Leurs résultats ont été confirmés par les constatations faites avec d'autres dispositifs, tels que les machines à galets (fig. V-113) : il est possible d'assimiler les conditions instantanées existant au point de contact des dentures à celles rencontrées sur deux galets tournant en sens contraire, dont les rayons sont respectivement égaux aux rayons de courbure des dentures au point considéré et dont les vitesses périphériques sont égales aux vitesses de roulement des profils. Ces résultats montrent

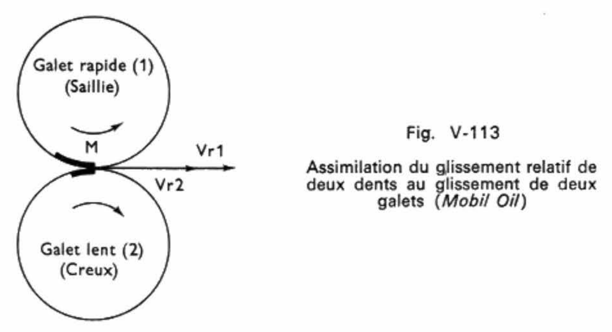


Fig. V-113

Assimilation du glissement relatif de deux dents au glissement de deux galets (*Mobil Oil*)

que l'épaisseur du film est proportionnelle à la somme des vitesses de roulement des surfaces en contact et que leur différence (vitesse de glissement) intervient pour accroître localement la température au sein de l'huile et abaisser sa viscosité. Donc, sur deux roues identiques pour lesquelles la somme des vitesses de roulement est constante, l'épaisseur du film devrait être constante le long du profil de la dent. Cependant, l'échauffement de l'huile, proportionnel au glissement, sera plus important sur le pied et à la tête de la dent que sur le cercle primitif et dans ces zones l'huile sera plus fluide, et l'épaisseur du film moindre, que dans des conditions de roulement pur, c'est-à-dire au niveau du cercle primitif.

Par ailleurs, ces travaux ont montré que la théorie hydrodynamique classique n'était plus applicable aux charges élevées généralement rencontrées dans les engrenages et qu'il faut tenir compte de l'existence de surfaces de

contact, de l'accroissement notable de la viscosité de l'huile avec la pression (ces deux facteurs étant favorables à la capacité de charge), de la compressibilité du lubrifiant et des phénomènes thermiques ayant lieu au cours de l'engrènement. Une théorie nouvelle, appelée élastohydrodynamique et tenant compte de tous ces éléments, montre que l'épaisseur du film d'huile ne diminue que très peu lorsque la charge augmente et qu'elle est d'autant plus importante que les rayons de courbure au point de contact sont grands, la charge faible, les vitesses de roulement élevées, l'huile visqueuse et la température basse.

Pour un engrenage déterminé, les vitesses de roulement et de glissement augmentant avec sa vitesse angulaire, l'accroissement de la vitesse de rotation favorise la formation du coin d'huile et le refroidissement des surfaces en contact mais entraîne un échauffement des surfaces qui oblige à réduire la charge. Au fur et à mesure que la vitesse s'élève, le premier phénomène (hydrodynamique) s'amplifie pour devenir prépondérant alors que le second (thermique) s'amenuise. On peut donc, sur un engrenage tournant à grande vitesse, employer une huile relativement fluide à condition, toutefois, que la force centrifuge ne soit pas assez importante pour la rejeter à l'extérieur. L'emploi d'une huile fluide s'impose d'ailleurs dans ce cas pour d'autres raisons : éviter un échauffement excessif par le brassage de l'huile si le graissage s'effectue par barbotage et obtenir une injection et un engagement faciles du lubrifiant s'il s'agit d'un graissage par circulation. Lorsque la vitesse de rotation est faible, ces facteurs se trouvent inversés et on emploie une huile visqueuse.

Quand les conditions de fonctionnement sont sévères, la formation du coin d'huile est rendue difficile, sinon impossible. Les dentures ne peuvent alors être protégées que par un film limite. Il faut alors que le lubrifiant adhère aux surfaces métalliques et permette la formation de ce film limite résistant à l'écrasement et au cisaillement.

Il existe trois moyens de supprimer les risques d'interférences : augmenter l'angle de pression, réduire la hauteur des dents (denture basse) ou bien déporter les profils, c'est-à-dire les placer de façon dissymétrique par rapport à leurs cercles primitifs (fig. V-115). Les deux premiers ne sont pratiquement plus utilisés car ils affaiblissent la valeur de l'arc de conduite qui correspond au segment de la ligne d'action compris entre les deux cercles de tête et le long duquel deux dents sont en contact effectif (V. fig. V-108 b). Le dernier, seul appliqué, contribue, par ailleurs, à égaliser les glissements spécifiques aux points extrêmes de contact.

De plus, on est amené à modifier le profil théorique pour permettre aux dents de prendre contact avec douceur, surtout pour les engrenages très chargés et tournant à grande vitesse. En effet, lors de leur fonctionnement en charge, les dents en contact fléchissent, ce qui a pour effet de réduire le pas de la denture menante et d'augmenter celui de la denture menée le long de la ligne d'action (fig. V-116, V-117 et V-118). La dent menante non encore engagée se trouve, par suite, dans une position plus avancée que la dent menée correspondante et interfère avec elle d'où choc, détérioration et bruit. On pratique alors une légère dépouille au sommet des dents menées ou un léger dégagement au pied des dents menantes.

7.2.7. Engrenages intérieurs. — Ils permettent un rapport de vitesses élevé pour un entraxe faible. Les profils s'établissent avec les mêmes règles que pour les engrenages extérieurs, seules les pointes de dents ont un rayon plus important. Le sens de rotation des roues n'est plus inverse, mais identique. Pour éviter les interférences, il faut que la différence entre le nombre de dents de la roue et du pignon soit supérieure à six pour un angle de pression de 20°.

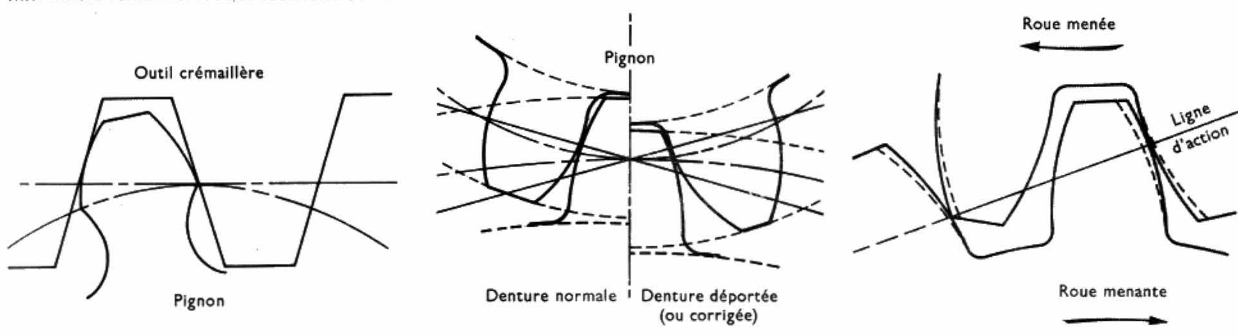


Fig. V-114 — Interférences au taillage par outil crémaillère (*Mobil Oil*)

Fig. V-115 — Déport du profil des dentures (*Mobil Oil*)

Fig. V-116 — Fléchissement des dents au cours de l'engrènement (*Mobil Oil*)

7.2.6. Interférences et corrections des dentures. — Les conditions d'engrènement des dentures doivent éviter que les profils interfèrent, c'est-à-dire entrent en contact sans être tangents et se coupent. Ce phénomène est responsable de fortes vibrations et d'une usure rapide. Il peut être dû, en particulier, au fait que la développante de cercle n'existe qu'au-dessus de son cercle de base et qu'il n'y a pas, au-dessous, de profil donnant un engrènement correct. Il peut également exister lors du taillage d'un pignon à petit nombre de dents par un outil-crémaillère (fig. V-114). Entre deux roues à denture normale, il a lieu en dessous d'un certain nombre de dents, variable avec l'angle de pression, égal à 20° :

Nombre de dents de la roue menée	$\alpha = 20°$	$\alpha = 14°30$
	Nombre minimal de dents de la roue menante	
12	13	19
20	14	22
30	15	24
60	16	27
Crémaillère	17	32

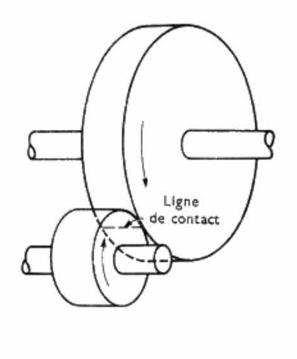


Fig. V-117

Surfaces primitives d'un engrenage parallèle à denture droite (*Mobil Oil*)

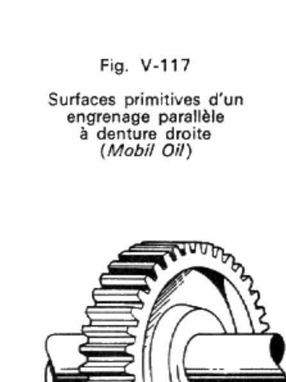


Fig. V-118

Engrenage parallèle à denture droite (*Mobil Oil*)

7.2.8. Crémaillère. — La crémaillère peut être considérée comme une roue de diamètre infini. Le profil devient une droite inclinée à 20° sur la verticale (fig. V-119). Le

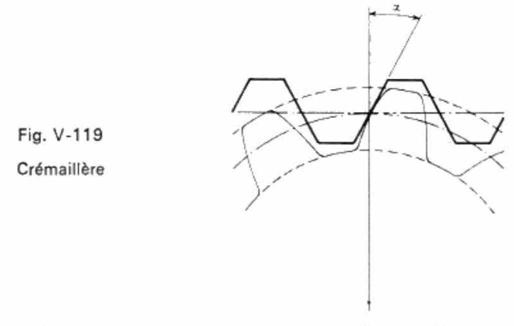


Fig. V-119
Crémaillère

nombre de dents des pignons doit être au moins de 17 pour éviter les interférences. Lorsque de petits engrenages engrènent avec une crémaillère, on arrondit assez fortement les angles au sommet des dents de celle-ci. Les crémaillères permettent de transformer le mouvement circulaire d'un pignon en un mouvement rectiligne alternatif.

7.2.9. Calcul des engrenages

1° *Résistance.* — La dent, travaillant à la flexion, est assimilée à une poutre encastrée (fig. V-120). L'effort

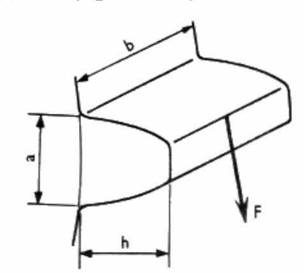


Fig. V-120
Une dent est soumise à un effort tangentiel F

tangentiel F est supposé supporté par une seule dent et appliqué à son extrémité, ce qui est le cas le plus défavorable car il y a toujours plus d'une dent en prise, et le moment fléchissant adopté pour le calcul a pour valeur : $\mathcal{M}_f = F \cdot h$. En appliquant la formule de résistance à la flexion, on a la contrainte dans la section d'encastrement (racine de la dent) :

$$n = \frac{\mathcal{M}_f}{\frac{I}{v}} = \frac{6\,Fh}{ba^2} \leqslant R_p$$

avec : F en décanewtons, a, b et h en millimètres, et R_p, contrainte admissible, en décanewtons par millimètre carré. En fonction du module m il vient (en prenant $a = e$) :

$$\frac{5{,}5\,F}{k \cdot m^2} \leqslant R_p$$

d'où le module en fonction de F :

$$m \geqslant \sqrt{\frac{5{,}5\,F}{k \cdot R_p}}$$

et en fonction du couple moteur C :

$$m \geqslant \sqrt[3]{\frac{11\,C}{k \cdot z \cdot R_p}}$$

Valeurs adoptées pour R_p :

Fonte ordinaire	1	à	2,5
Fonte spéciale	2	à	4
Acier moulé	5	à	8
Acier demi-dur	6	à	10
Acier nickel-chrome traité	20	à	30
Bronze phosphoreux	5	à	6,5
Céloron	2,5	à	4
Bois	0,5	à	1

On prend les valeurs les plus faibles dans le cas de vitesse élevée.

2° *Usure.* — Il est nécessaire de s'assurer que l'usure n'est pas trop importante. On vérifie que le facteur d'usure (empirique) : $u = \frac{F}{b}$ est inférieur aux valeurs suivantes (avec F en décanewtons et b en millimètres) : 20, pour le cuir ; 100, pour la fonte ; 200, pour l'acier moulé ou forgé et 200 à 500, pour les aciers spéciaux traités.

3° *Vitesse circonférentielle.* — La vitesse circonférentielle V a une grande répercussion sur l'usure et est fonction du matériau constituant l'engrenage et de la qualité de fabrication des dentures. Pour des engrenages on adopte en général. :

— en fonte avec denture brute : $V \leqslant 3$ m/s
— en fonte avec denture taillée : $V \leqslant 8$ m/s
— en acier demi-dur, denture taillée avec soin : $V \leqslant 12$ m/s
— en cuir vert et en céloron : $V \leqslant 15$ m/s
— en acier traité, à denture rectifiée et avec lubrification bien étudiée : $V = 40$ à 50 m/s

4° *Rendement.* — Il varie suivant la qualité du fini de la denture et le soin apporté à la lubrification. Dans les calculs on pourra adopter les rendements suivants :

— denture brute : 0,75 à 0,80
— denture taillée : 0,85 à 0,90
— denture rectifiée : 0,90 à 0,95.

Certains procédés de rectification particulièrement perfectionnés permettent d'atteindre un rendement de 0,98.

7.3. Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale

7.3.1. Généralités. — Dans les engrenages à denture droite, le passage d'une dent à l'autre s'accompagne toujours d'un léger choc augmentant avec l'usure, ce qui entraîne un fonctionnement irrégulier et bruyant principalement aux grandes vitesses. Pour éviter cet inconvénient, on utilise des dentures hélicoïdales : disposées en hélice sur le cylindre primitif (fig. V-121), elles ont toujours plus de deux dents simultanément en contact.

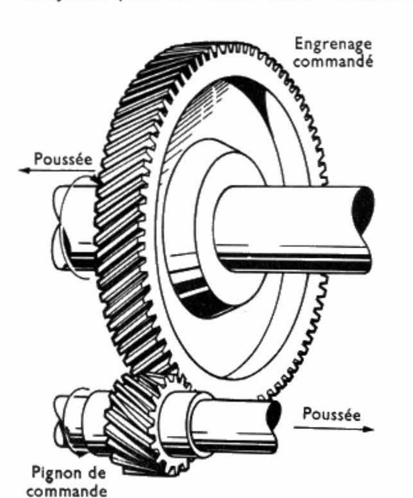


Fig. V-121
Engrenage parallèle à denture hélicoïdale (*Mobil Oil*)

En effet, l'arc de conduite de chaque couple de dents conjuguées (V. fig. V-108 b) est augmenté de l'arc correspondant à la longueur apparente de chaque dent le long du cercle primitif (fig. V-122) et les arcs de conduite de deux couples de dents successifs se recouvrent largement assurant un entraînement pratiquement continu. On obtient un fonctionnement régulier et silencieux, surtout aux grandes vitesses, et un rendement accru. De plus, on peut obtenir des entraxes quelconques en modifiant

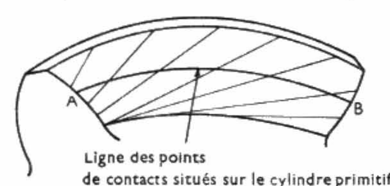


Fig. V-122
Positions successives de la ligne de contact sur une dent hélicoïdale (*Mobil Oil*)

l'angle d'hélice, alors que le choix des entraxes avec les engrenages à denture droite est limité aux multiples du module. Toutefois, l'effort, normal aux surfaces en contact, n'est pas orthogonal à l'axe des roues : sa composante axiale tend à faire glisser les arbres dans leurs paliers (fig. V-123) et il faut toujours prévoir des butées ou des bagues de frottement épaulées pour maintenir les roues l'une en face de l'autre. Les hélices de chacune des roues sont de sens contraires, l'une à droite, l'autre à gauche.

7.3.2. Définitions et calculs. — Pour un engrenage à denture hélicoïdale (fig. V-123), on appelle pas apparent le pas p_t mesuré dans un plan perpendiculaire à l'axe xx'.

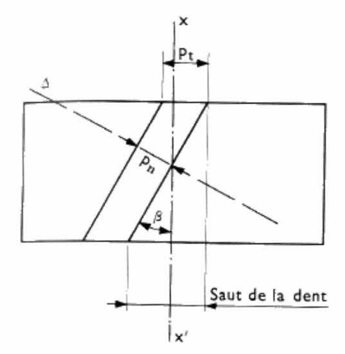


Fig. V-123
Schéma d'un engrenage à denture hélicoïdale

Ce pas apparent se mesure donc directement sur la face de l'engrenage. Si l'on coupe l'engrenage par un plan Δ perpendiculaire aux dents, on obtient sur l'ellipse d'intersection le pas réel p_n. Avec β, angle d'hélice, on a :

$$p_n = p_t \cos \beta$$

À ces deux pas correspondent :

— le module apparent : $m_t = \dfrac{p_t}{\pi}$

— et le module réel : $m_n = \dfrac{p_n}{\pi}$

Entre ces deux modules on a la relation :

$$m_n = m_t \cos \beta$$

Les différents éléments constituant la denture de ces engrenages sont liés par les formules :

$$d = m_t . z = \frac{m_n . z}{\cos \beta}$$

$$h_a = m_n$$

$$h_f = 1,25\ m_n$$

Le pas de l'hélice P aura pour valeur :

$$P = d \operatorname{cotg} \beta$$

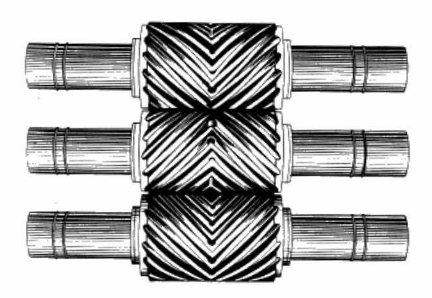


Fig. V-125 — Engrenage P.M.C.

Pour les engrenages à axes parallèles la valeur normale de β est de 20° et le nombre de dents minimal pour l'engrènement peut être de 12. En augmentant l'angle d'hélice, on peut admettre 6 à 7 dents comme nombre minimal. Le rapport de transmission de ces engrenages est le même que celui des engrenages droits, soit :

$$\frac{N}{N'} = \frac{d'}{d} = \frac{z'}{z}$$

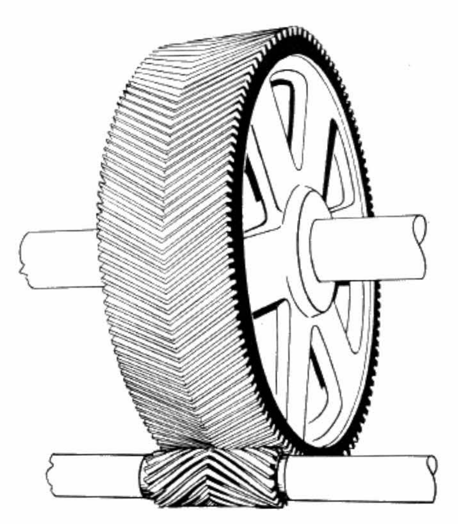


Fig. V-124 — Engrenage à denture à chevrons (*Mobil Oil*)

7.3.3. Engrenages à chevrons. — Conçus pour améliorer le rendement en supprimant les poussées axiales sur les arbres, les engrenages à chevrons sont constitués par deux dentures hélicoïdales de même largeur et de même angle d'hélice, mais de sens inverses (fig. V-124). Ils sont utilisés pour des efforts importants.

On peut les réaliser par juxtaposition de deux engrenages hélicoïdaux mais, dans le cas de grandes vitesses, il est indispensable d'utiliser des engrenages en une seule pièce. Ces derniers présentent une difficulté de taillage dans l'angle rentrant du chevron. Dans le système Kosmos, le dégagement des outils est obtenu, soit en séparant les deux dentures par une gorge, soit en alternant les dents des deux dentures. Pour conserver la liaison entre les dents des deux dentures et l'augmentation de résistance qu'elle procure, on emploie le système P.M.C. ou le système Citroën : le premier comporte un petit dégagement d'outil dans l'angle rentrant (fig. V-125) et pour le second est prévu un congé dans l'angle rentrant et un rayon à la pointe du chevron.

La denture à chevron permet d'obtenir des rapports de transmission très élevés : avec 4 dents au pignon, on peut dépasser 10, et cela avec des vitesses circonférentielles de 20 m/s, alors qu'avec les dentures droites il est difficile de dépasser 5.

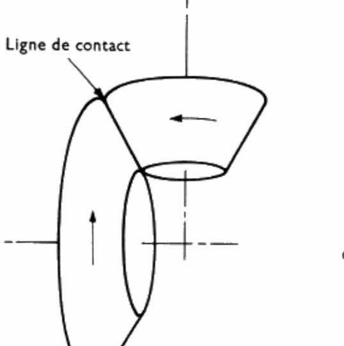


Fig. V-126 — Surfaces primitives d'un engrenage conique à denture droite

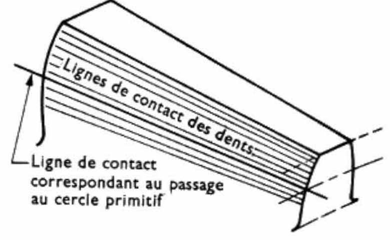


Fig. V-127 — Dent d'engrenage conique à denture droite : positions successives de la ligne de contact

7.4. Engrenages coniques

7.4.1. Généralités. — Les engrenages coniques permettent la transmission du mouvement entre deux arbres concourants dont le point de rencontre est obligatoirement le sommet des deux cônes primitifs. Par conséquent, il y a un couple unique de surfaces coniques conjuguées pour chaque rapport de vitesse d'un couple conique sans changer ensemble les deux engrenages (fig. V-126 et V-127).

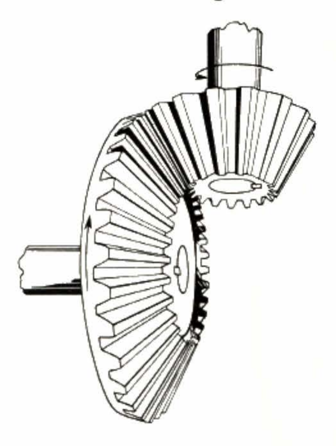


Fig. V-128 — Engrenage conique à denture droite (*Mobil Oil*)

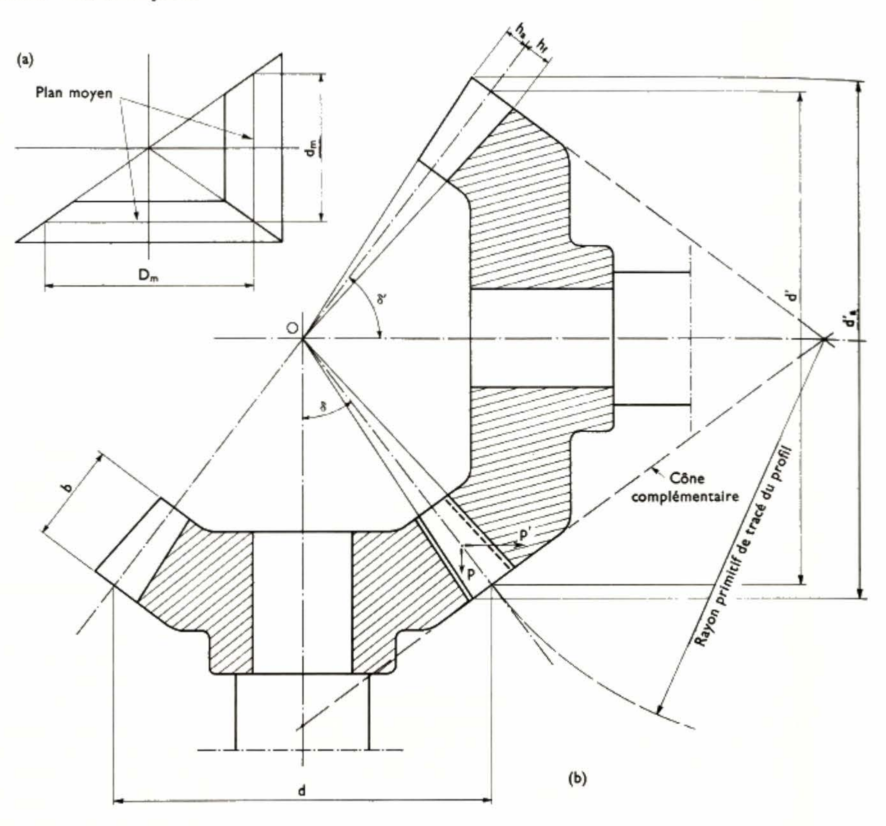


Fig. V-129 a et b Engrenage conique

7.4.2. Denture droite. — Les définitions des éléments de denture de ces engrenages (fig. V-128) sont les mêmes que celles des engrenages cylindriques à denture droite (V. § 7.2.1). Pour le choix des dimensions, on considère, dans le plan moyen de chaque denture, les deux diamètres D_m et d_m comme transmettant le mouvement (fig. V-129 a). L'effort tangentiel correspondant F détermine le module moyen (calcul conduit comme pour les engrenages droits) ; on en déduit par similitude le module nominal m et toutes les dimensions qui lui sont proportionnelles, mesurées sur le cône complémentaire (fig. V-129 b) :

$$h_a = m$$
$$h_f = 1{,}25\, m$$
$$d = m \cdot z$$

La longueur des dents b varie de 4 à 8 m.

Le rapport des vitesses est égal au rapport inverse du nombre de dents :

$$\frac{N}{N'} = \frac{z'}{z}$$

Comme pour les engrenages hélicoïdaux, il existe des poussées axiales tendant à éloigner les engrenages que l'on monte généralement sur des portées en bout d'arbres (fig. V-129 b). Ces poussées axiales P et P' ont comme valeurs :

$$P = F \cdot \sin \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha$$
$$P' = F \cdot \cos \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

α étant l'angle de pression du profil de la denture. Le rendement, avec des engrenages soigneusement taillés, atteint 0,9 à 0,95.

7.4.3. Denture hélicoïdale et denture spirale. — Dans l'engrenage conique à denture droite, la courbe directrice de la dent est une droite AO, génératrice du cône primitif (fig. V-130). Pour les mêmes raisons que dans les engrenages cylindriques, engrènement continu et fonctionnement silencieux, on utilise souvent des engrenages coniques à denture hélicoïdale, dans laquelle la courbe directrice est une droite AB faisant un angle β avec AO, et des engrenages coniques à denture spirale, dans laquelle la courbe directrice est un cercle faisant un angle β en A avec AO. L'angle β est voisin de 30°. Les derniers, plus faciles à tailler, sont très fréquents ; ils sont connus sous le nom d'engrenages spiraux coniques Gleason (fig. V-131).

7.5. Engrenages gauches ou hyperboliques. — Ces engrenages sont employés pour assurer une transmission de mouvement entre deux arbres non situés dans un même plan, ces arbres étant en général à angle droit. Les surfaces primitives des dentures sont des hyperboloïdes de révolution tangents le long d'une génératrice commune (fig. V-132) et le roulement des flancs des dents s'accompagne d'un important glissement parallèle à cette génératrice. Ce glissement longitudinal se combine avec le glissement radial. La vitesse du glissement résultant peut atteindre, pour un engrenage hypoïde aux vitesses

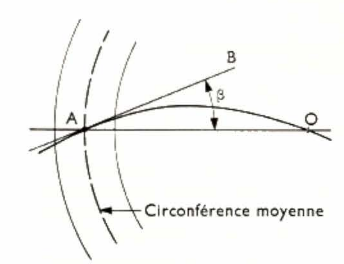


Fig. V-130 — Denture hélicoïdale et spirale



Fig. V-131 — Engrenage concourant à denture spirale Gleason (*Mobil Oil*)

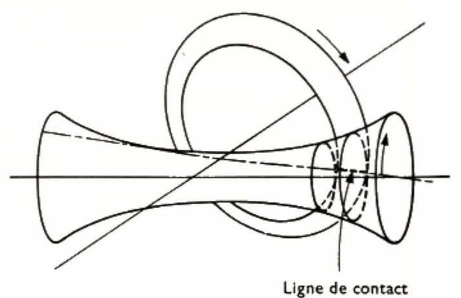
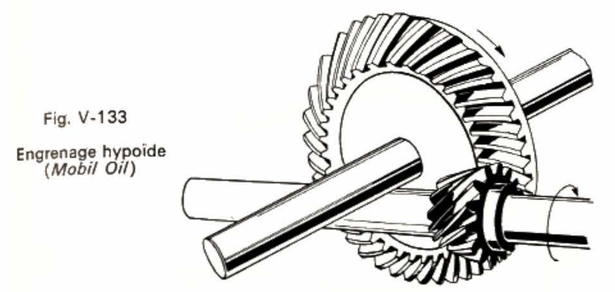


Fig. V-132 — Surfaces primitives d'un engrenage hypoïde

usuelles de rotation, 350 m/mn au diamètre primitif et 600 m/mn au sommet des dents (contre 0 et 50 m/mn pour un engrenage conique à denture spirale de mêmes dimensions). Ce glissement limite la distance admissible entre les arbres ainsi que la vitesse d'utilisation ; par ailleurs, il soumet la pellicule d'huile à une action de balayage intense : d'où un échauffement considérable du métal sur les surfaces des dents et un rendement en général inférieur à 80 %.

7.5.1. Engrenages hypoïdes. — Les dents sont taillées loin des cercles de gorge des hyperboloïdes et ce type d'engrenages est employé à la place des engrenages coniques lorsque la construction rend nécessaire le passage des arbres l'un au-dessus de l'autre (fig. V-133), par exemple pour la commande des machines de papeterie à grande vitesse. Dans ce cas, ils peuvent être largement dimensionnés, ce qui permet de réduire la pression de contact et d'assurer leur graissage dans des conditions moins sévères.


Fig. V-133

Engrenage hypoïde (*Mobil Oil*)

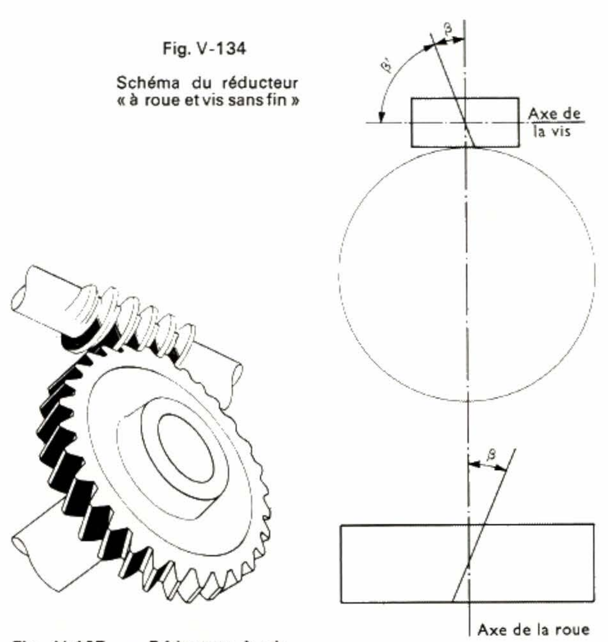


Fig. V-134

Schéma du réducteur « à roue et vis sans fin »

Fig. V-135 — Réducteur à vis sans fin et roue cylindrique à denture hélicoïdale (*Mobil Oil*)

7.5.2. Engrenages hélicoïdaux à axes perpendiculaires non concourants. — Les dents sont taillées de part et d'autre des cercles de gorge des hyperboloïdes primitifs, ces cercles ayant alors un point commun sur la perpendiculaire commune aux deux axes. L'emploi d'engrenages cylindriques à denture hélicoïdale (facilité de taillage) est fréquent, mais dans ce cas les contacts entre les dents sont ponctuels, ce qui limite la capacité de charge et la puissance transmissible. Dans ces engrenages, les hélices sont de même sens et leurs angles β et β' (compris entre 30° et 60°) doivent être tels que :

$$\beta + \beta' = 90°$$

Le module réel est le même sur les deux roues (pour que l'engrènement soit possible) mais les modules apparents sont différents :

$$M_n = M_t . \cos \beta = M'_t . \cos \beta'$$

Là encore, le rapport des vitesses est dans le rapport inverse du nombre de dents :

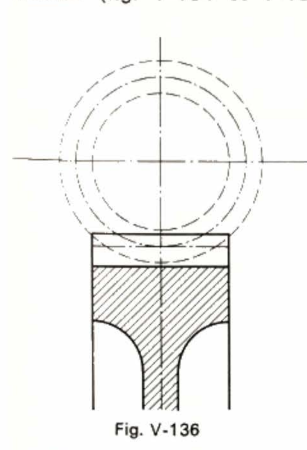
$$\frac{N}{N'} = \frac{z'}{z}$$

7.5.3. Roue et vis sans fin. — Le système roue et vis sans fin est un cas particulier des engrenages à axes non concourants. Ce dispositif permet de grandes réductions de vitesses (fig. V-134 et V-135). On peut le considérer comme étant réalisé par deux roues cylindriques à denture hélicoïdale dont l'angle d'hélice β' de la petite roue est tel que celle-ci prend la forme d'une vis à plusieurs filets dont le profil est complémentaire de celui des dents de la roue. On emploie surtout le profil trapézoïdal qui permet d'avoir une roue à profil classique en développante de cercle.

Les formules sont les mêmes que pour les engrenages hélicoïdaux à axes non concourants, le nombre de dents z' de la petite roue étant le nombre de filets de la vis.

Suivant l'inclinaison de l'hélice, le système est réversible ou non. L'irréversibilité, obtenue pour $\beta \leqslant 6°$, est utilisée comme sécurité dans les commandes de palans ou de treuils, par exemple, avec un rendement voisin de 40 %. Les rendements de 85 à 90 % peuvent être atteints en employant un système réversible construit avec des matériaux à faible coefficient de frottement et avec $\beta \approx 45°$.

Pour transmettre de faibles efforts, on emploie une roue cylindrique à denture hélicoïdale, dont les contacts des dents avec les filets de la vis sont ponctuels (fig. V-136). Si les efforts ont une certaine importance, on utilise une roue creuse, dont les contacts des dents avec les filets de la vis sont linéaires (fig. V-137). Pour la transmission de très grands efforts, on augmente le nombre de dents en prise par l'utilisation de vis globiques (fig. V-138), dispositif réservé à de faibles vitesses par suite de ses frottements importants.


Fig. V-136

Vis sans fin et roue droite

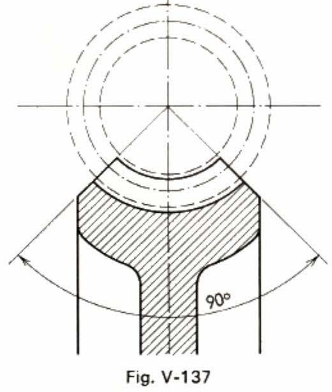


Fig. V-137

Vis sans fin et roue creuse

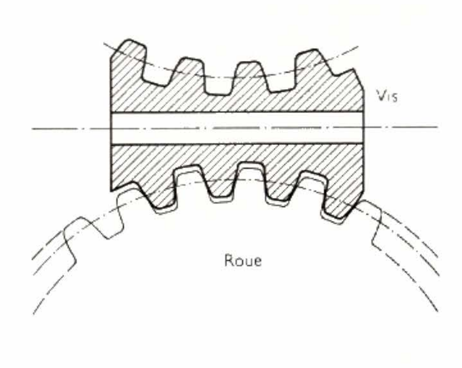


Fig. V-138

Vis globique

Remarque : Avec le système roue et vis sans fin, une poussée axiale s'exerce sur la vis. Sa valeur, voisine de celle de l'effort tangentiel, nécessite l'emploi d'une butée à billes pour le guidage de la vis. De plus, les frottements très importants et les risques de grippage correspondants imposent des matérieux différents pour la vis et la roue (en général : vis en acier et roue en bronze) et une lubrification soignée (barbotage ou circulation d'huile dans un carter étanche).

7.6. Lubrification des engrenages

7.6.1. Critères de construction ou de service. — Les engrenages sont en général enfermés dans des carters qui les protègent contre l'introduction de matières étrangères et évitent les pertes d'huile. Celle-ci est appliquée sur les engrenages soit par barbotage, soit par circulation, et, dans les deux cas, le graissage est abondant. La formation du coin d'huile est plus malaisée que dans le cas des paliers et le choix du lubrifiant à employer dans chaque cas particulier dépend des facteurs suivants :

1° *Type d'engrenages.* — Pour les engrenages cylindriques ou coniques à denture droite ou hélicoïdale, la direction du mouvement par rapport à la ligne de contact rend en général possible la formation du coin d'huile et la viscosité de l'huile employée dépend surtout de la vitesse. Dans les engrenages à vis sans fin, la faible vitesse et l'importance du glissement rendent très difficile la formation du coin d'huile et il est indispensable d'employer une huile de viscosité élevée ayant une forte résistance du film et une onctuosité prononcée.

Dans les engrenages hypoïdes, la grande vitesse de glissement, la pression de contact élevée, l'échauffement considérable de la surface des dents et le risque correspondant de soudure de certaines aspérités des dentures (microgrippage) imposent l'emploi d'huiles spéciales dites antisoudure ou extrême pression.

2° *Vitesse des roues.* — Lorsque le graissage peut être effectué par l'intermédiaire du coin d'huile, la vitesse favorise la formation de ce dernier et l'on peut employer des huiles d'autant plus fluides que la vitesse des engrenages est plus élevée.

3° *Rapport de réduction.* — Les réducteurs à un seul train d'engrenages ne donnent pas lieu à des considérations spéciales. Pour les réducteurs à réductions multiples, l'huile doit répondre aux conditions de fonctionnement du train d'engrenages le plus lent, d'où l'emploi d'une huile relativement visqueuse.

4° *Température de service.* — La chaleur engendrée par les divers frottements et par le barattage de l'huile élève la température de cette dernière. Seuls les engrenages hypoïdes et à vis fonctionnent normalement à haute température (90 °C pour les applications industrielles et 120 °C pour les applications automobiles). Pour les engrenages à dentures droite ou hélicoïdale placés dans une ambiance normale, la température maximale de l'huile n'excède pas 65° C en général. Si la température dépasse ces valeurs (engrenages placés près d'une source de chaleur), il faut adopter une huile de viscosité plus élevée. Au contraire, l'exposition au froid pose le problème délicat du choix d'une huile assez fluide à froid pour faciliter le démarrage mais ayant cependant un film suffisamment résistant à la température normale de service.

5° *Puissance transmise.* — Pour un même type de réducteur (dentures usinées dans un même métal et supportant la même charge unitaire), le refroidissement naturel est moins efficace, et la température de l'huile plus élevée, dans les gros réducteurs transmettant de fortes puissances que dans les petits. On doit donc utiliser un lubrifiant d'autant plus visqueux que la puissance transmise est plus importante.

6° *Couple résistant.* — Sa régularité a une influence notable sur le choix du lubrifiant, une brusque variation de la charge donnant des chocs sur les dentures qui tendent à rompre le film d'huile. Pour tenir compte de ce facteur, il faut employer une huile plus visqueuse que ne l'exigerait le couple nominal indiqué (couple moyen). C'est en particulier le cas des trains de laminoirs : une usure rapide des engrenages des cages à pignons et des réducteurs ne peut être évitée que par l'emploi d'un lubrifiant formant un film extrêmement résistant.

7° *Couple moteur.* — Pour les mêmes raisons, les moteurs alternatifs (à vapeur ou à explosion), qui exercent sur les engrenages un couple périodique dont la valeur instantanée peut être beaucoup plus grande que la valeur moyenne, nécessitent des huiles plus visqueuses que les moteurs électriques ou les turbines dont le couple est constant.

7.6.2. Graissage par barbotage. — Cette méthode simple et économique est la plus courante pour les engrenages de petites et moyennes dimensions. L'huile est projetée sur toutes les parties de l'engrenage par les dents qui plongent dans le bain d'huile se trouvant au fond du carter. Dans la plupart des cas, le graissage des paliers est également assuré (fig. V-139 et V-140). Si la vitesse est très faible, des dispositifs spéciaux alimentent les paliers (fig. V-141).

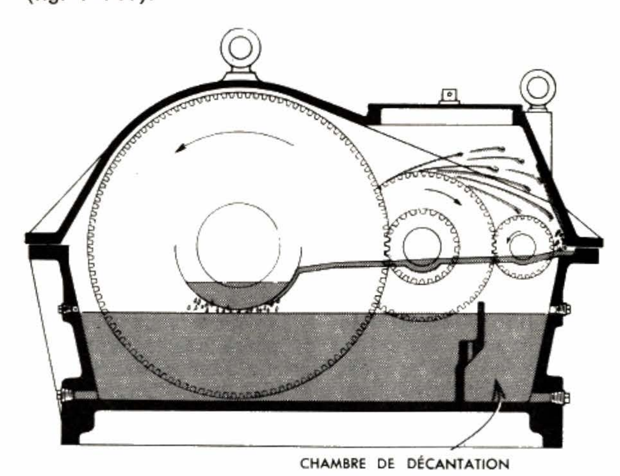


Fig. V-139 — Trains d'engrenages lubrifiés par barbotage (*Mobil Oil*)

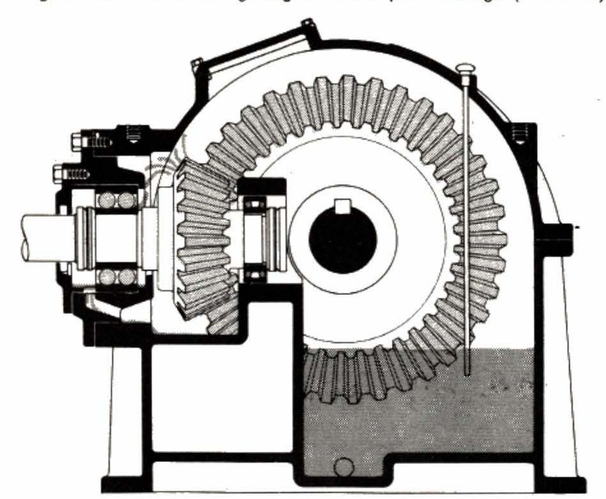


Fig. V-140 — Couple conique lubrifié par barbotage (*Mobil Oil*)

Il est essentiel de maintenir l'huile du bain à son niveau normal : si le niveau est trop bas, la lubrification devient insuffisante ; s'il est trop élevé, il se produit un barattage excessif et un échauffement dangereux de l'huile dont la viscosité s'abaisse (en particulier pour les engrenages à grande vitesse). Il est donc important de le contrôler régulièrement et toujours après un temps d'arrêt suffisant pour permettre l'égouttage complet des organes et de la paroi interne du carter.

Le graissage par barbotage présente deux inconvénients : d'une part, l'huile est constamment agitée et les impuretés dont elle se charge restent en suspension ; d'autre part, l'huile n'est pas refroidie par une action extérieure. L'emploi

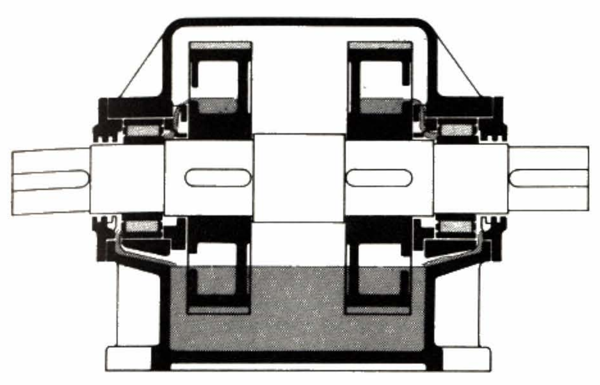


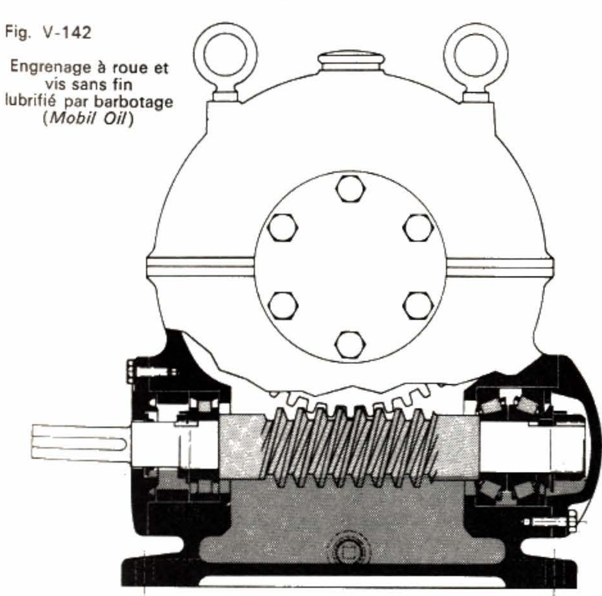
Fig. V-141 — Engrenages ents comportant un réservoir d'huile pour alimentation des paliers (*Mobil Oil*)

de bouchons de vidange magnétiques, devenu systématique, supprime pratiquement le premier. Le second influe essentiellement sur le choix de la viscosité de l'huile. Ce choix dépend de la température minimale de démarrage et surtout de la température maximale en service de la denture, température à laquelle l'huile doit avoir une viscosité et une onctuosité suffisantes pour résister à l'action des pressions et de la force centrifuge. L'évaluation de cette température maximale de service est délicate, la température extérieure du carter ne donnant qu'une indication. La seule méthode rationnelle consiste à mesurer la température de l'huile dans le carter : on admet en général que cette température est inférieure de 30 °C à celle de la denture.

La distance d'entraînement de l'huile par adhérence doit être minimale pour que le lubrifiant soit amené en quantité suffisante dans la zone d'engrènement. La viscosité de l'huile, la position relative des engrenages, leur sens de rotation et leur vitesse de rotation ont à cet égard une influence déterminante. Le graissage par barbotage est déconseillé pour les engrenages étagés en hauteur, tels que ceux rencontrés dans les boîtes de vitesses de certaines machines-outils, les trains supérieurs risquant d'être insuffisamment lubrifiés. Il est également déconseillé pour des vitesses périphériques supérieures à 12 m/s. Les roues et vis sans fin graissées par barbotage peuvent être montées de différentes façons. Avec une roue à axe horizontal et la vis placée au-dessus, la roue plonge dans le bain de lubrifiant et n'amène dans l'engrènement qu'une faible quantité d'huile dont la viscosité doit être suffisante. En revanche, quand la vis est sous la roue, cette quantité d'huile est toujours suffisante (fig. V-142). Cette dernière disposition est la seule qui convienne pour un fonctionnement intermittent ou à très faible vitesse.

Fig. V-142

Engrenage à roue et vis sans fin lubrifié par barbotage (*Mobil Oil*)



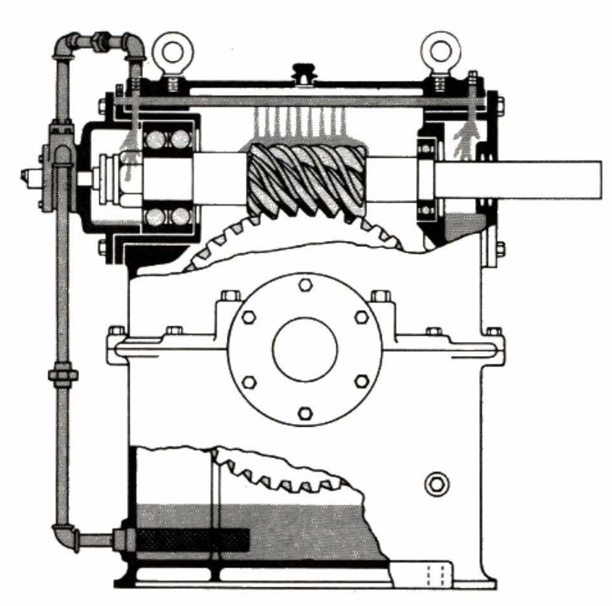


Fig. V-143 — Lubrification des paliers, de la vis et de la roue par un système à circulation (*Mobil Oil*)

7.6.3. Graissage par circulation. — Dans un système par circulation, le graissage des dentures (et des paliers) est assuré par des canalisations dans lesquelles une pompe envoie l'huile sous pression. Sur les réducteurs de petites et moyennes dimensions, le réducteur assure lui-même l'entraînement de la pompe, habituellement à engrenages (fig. V-143) ; sur les réducteurs importants ou les ensembles de réducteurs, l'entraînement de la pompe est fait par un moteur indépendant. Le lubrifiant est utilisé d'une façon continue pendant une durée relativement longue qui dépend surtout de sa stabilité chimique, c'est-à-dire de sa résistance à l'oxydation.

L'huile est amenée le plus près possible de la zone d'engrènement, soit par des ajutages (sous forme de jet ou de brouillard), soit en la laissant tomber sur un déflecteur qui la dirige vers cette zone. La forme, l'orientation et la distance des buses doivent être telles que les jets soient dirigés dans le sens de rotation des dentures, qu'ils les atteignent sous l'angle le plus aigu possible et avec une force suffisante pour ne pas être déviés par les remous aériens que le mouvement des dentures provoque à proximité de l'engrènement. Il est inutile d'introduire de l'huile ailleurs : projetée par la force centrifuge, elle ne participerait pas au graissage.

Pour les engrenages tournant à grande vitesse, la quantité d'huile amenée à l'engrènement doit être réduite. On a en effet constaté, avec un graissage abondant, une perte de puissance et une fatigue anormale des paliers. Pour de tels engrenages, un brouillard d'huile pulvérisée à l'intérieur du carter suffit à assurer le graissage des dentures, le refroidissement étant obtenu en déversant indépendamment une quantité d'huile suffisante sur les faces latérales des engrenages et, si nécessaire, par une arrivée d'huile complémentaire prévue en aval de l'engrènement. On peut assurer le graissage d'un ensemble d'engrenages (par exemple, réducteurs et cages à pignons de laminoir continu, commandes de machines à papier) au moyen d'un système par circulation centralisé qui a l'avantage de conserver l'huile en parfait état (refroidissement et épuration continus).

Le débit d'huile d'un système de graissage par circulation est essentiellement basé sur la quantité de chaleur à évacuer, celle-ci pouvant être évaluée à partir de la puissance transmise par l'engrenage lubrifié et en fonction de son rendement.

7.6.4. Graissage à la graisse. — Ce mode de graissage est réservé aux petits réducteurs sous carter de l'outillage électrique portatif (perceuses, ponceuses, cisailles grignoteuses). Quelques constructeurs de motoréducteurs l'ont adopté pour des puissances inférieures à 35 kW et on y a parfois recours pour les engrenages qui

fonctionnent dans des carters dont il est difficile d'assurer une bonne étanchéité (matériel de mines, matériel sidérurgique ou agricole). Ce graissage offre divers avantages : il permet de réduire ou de supprimer les fuites de lubrifiant sans emploi de joints d'étanchéité ; il facilite le transport des mécanismes qu'il équipe et permet leur utilisation dans n'importe quelle position ; enfin, il simplifie l'entretien (remplacement de la graisse après plusieurs milliers d'heures de marche). Toutefois, il n'assure pas un refroidissement efficace, la chaleur dégagée n'étant transmise au carter que par conduction ; il nécessite une dureté des dentures plus grande que pour la lubrification à l'huile, les particules de métal détachées par l'usure restant dans la graisse ; il demande une mise au point des formes intérieures du carter, le déplacement de la graisse durant la marche devant être orienté vers l'engrènement ; enfin, il exige l'emploi d'une graisse parfaitement appropriée (consistance à la température de fonctionnement et stabilité dans le temps) et son efficacité dépend du remplissage correct du carter. L'utilisateur doit donc respecter les prescriptions du constructeur : qualité, quantité et périodicité de remplacement de la graisse. Si le carter ne peut pas être ouvert facilement, l'évacuation de la graisse usagée nécessite deux rinçages successifs, effectués exclusivement avec une huile légère de rinçage préalablement chauffée et suivis d'un égouttage complet.

7.7. Construction des engrenages

7.7.1. Matériaux. — Les qualités exigées des matériaux utilisés pour la réalisation des engrenages sont une résistance à la rupture et une limite d'élasticité élevée, ainsi qu'une grande résistance à l'usure, afin de conserver aux dentures leur forme et leur précision initiales et d'éviter la formation d'un jeu, provoquant à la fois bruit et vibrations. La résistance aux chocs (résilience élevée) est nécessaire dans le cas de la commande de machines subissant des à-coups (broyeurs, laminoirs). Ces matériaux devront avoir en outre un faible coefficient de frottement pour réduire l'énergie perdue par frottement et l'échauffement qui en résulte. Les matériaux employés sont essentiellement les métaux ferreux, en raison de leurs caractéristiques mécaniques élevées : fonte ordinaire, fonte à graphite sphéroïdal, acier moulé, aciers non alliés et aciers alliés au nickel ou au nickel-chrome. Les caractéristiques de ces derniers sont améliorées par des traitements thermiques (trempe) et par des traitements de surface (cémentation). Les alliages de cuivre sont également utilisés, notamment le bronze et le bronze phosphoreux, en raison de leur faible coefficient de frottement sur l'acier. On emploie aussi des matériaux non métalliques comme les bois améliorés, le céloron, le nylon et le teflon, ce dernier ayant un coefficient de frottement particulièrement bas. Enfin, les matières plastiques sont utilisées pour leur élasticité qui permet un fonctionnement silencieux.

7.7.2. Formes des engrenages

1° *Jante.* — Sa résistance doit être suffisante puisque c'est la partie de l'engrenage qui supporte la denture ; son épaisseur est voisine de 1,5 à 2 m (fig. V-144). Pour les engrenages transmettant des efforts importants, on utilise souvent des jantes à nervure (fig. V-145) ou à section à double T (fig. V-146).

2° *Moyeu.* — Il assure la liaison avec l'arbre et la transmission du couple. Son diamètre et sa longueur dépendent de son mode de fixation sur l'arbre (montage à la presse, clavetage libre ou emmanchement conique).

3° *Liaison jante-moyeu.* — Pour les faibles diamètres, c'est un disque plein de même épaisseur que la jante (fig. V-147). Pour les diamètres moyens, la toile de liaison est pleine pour les pièces forgées ou décolletées et évidée pour les pièces moulées (fig. V-148). Lorsque le diamètre est important, la liaison est faite par des bras de section rectangulaire ou elliptique pour de faibles efforts (fig. V-149) et en croix pour des efforts importants (fig. V-150). Pour les engrenages coniques les mêmes dispositions sont utilisées mais, dans le cas de toile mince (ou de bras), des nervures encaissent les efforts axiaux (fig. V-151).

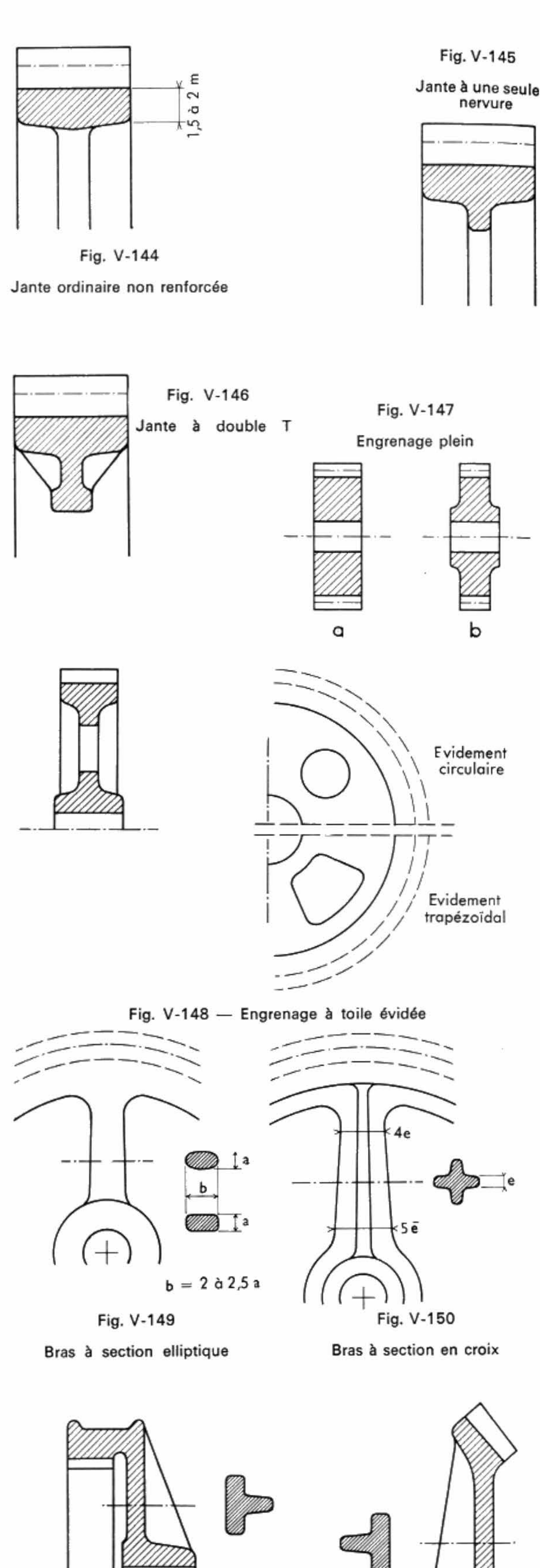


Fig. V-144 Jante ordinaire non renforcée

Fig. V-145 Jante à une seule nervure

Fig. V-146 Jante à double T

Fig. V-147 Engrenage plein

Fig. V-148 — Engrenage à toile évidée

Fig. V-149 Bras à section elliptique

Fig. V-150 Bras à section en croix

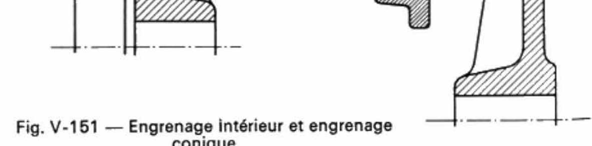


Fig. V-151 — Engrenage intérieur et engrenage conique

4° *Engrenages en plusieurs parties.* — Pour de très grandes dimensions, on exécute parfois les engrenages en plusieurs éléments afin de faciliter manutention et montage. Ces éléments sont coulés ou mécanosoudés. On usine leurs plans de joints ; l'usinage du moyeu et de la jante et le taillage sont faits après assemblage.

7.7.3. Engrenages silencieux. — Pour obtenir souplesse de transmission et silence aux grandes vitesses, on emploie un pignon en céloron ou en matière plastique engrenant avec une roue métallique.

1° *Pignons en céloron.* — Le céloron a pratiquement remplacé le cuir vert (empilage de rondelles de cuir chromé collées). Il est composé de fibres de coton, résistant à la traction, noyées dans de la bakélite imperméable, résistant à la compression. Il est insensible aux huiles. Ces pignons s'emploient avec des engrenages en acier ou en fonte de largeur de denture supérieure à celle du pignon. Ils conviennent très bien pour les grandes vitesses et sont utilisés dans certaines commandes de machines-outils, ainsi que dans la commande de la distribution des moteurs d'automobiles.

2° *Pignons en nylon technyl.* — Par suite de l'élasticité élevée de ce matériau, on peut admettre que la charge est répartie sur plusieurs dents en prise et non plus sur une seule comme dans les pignons métalliques (fig. V-152). De plus, les inexactitudes éventuelles des surfaces frottantes sont compensées par cette élasticité. Pour le calcul des dents (V. § 7.2.9, 1°), on prend une contrainte admissible de 1,7 daN/mm^2.

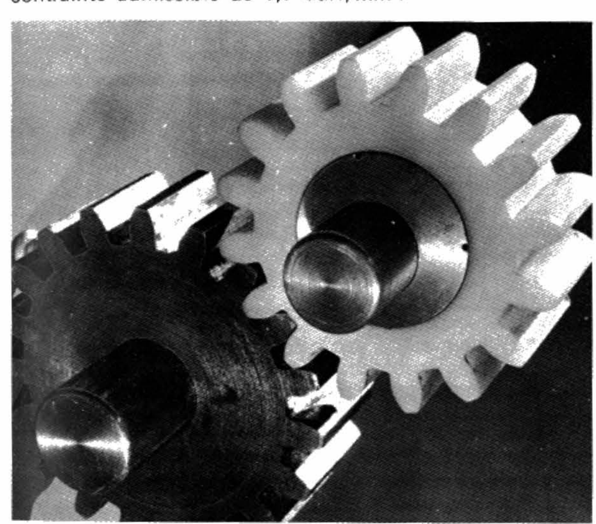


Fig. V-152 — Pignons en nylon « Technyl » (*André Gamet*)

Des précautions doivent être prises du fait du faible coefficient de conductibilité thermique et du coefficient de dilatation linéaire élevé. Le jeu nécessaire pour éviter en service le coincement de l'engrenage du fait de la dilatation est relativement facile à déterminer si le pignon a subi un traitement de stabilisation et s'il a été saturé d'eau, la température seule modifiant alors ses dimensions.

Par ailleurs, afin de faciliter le démarrage d'un ensemble comportant des pignons en nylon, il est recommandé de lubrifier légèrement. Après un certain temps de rodage, les pignons peuvent fonctionner sans lubrifiant.

7.8. Trains d'engrenages. — En accouplant plusieurs engrenages on réalise des trains d'engrenages permettant de passer d'une vitesse de rotation N à une vitesse N' plus grande ou plus faible. Dans le premier cas on obtient un multiplicateur de vitesses et dans le second on réalise un réducteur. On utilise un ou plusieurs couples d'engrenages, suivant la valeur du rapport des vitesses désiré. Soit un train d'engrenages formé de trois couples dont les nombres des dents sont z, z', z_1, z'_1, z_2, z'_2 transformant la vitesse de rotation N en une vitesse N' (fig. V-153) ; le rapport $\frac{N'}{N} = R$, appelé *raison totale* du train d'engrenages, peut s'exprimer en fonction du nombre de dents des engrenages en prises :

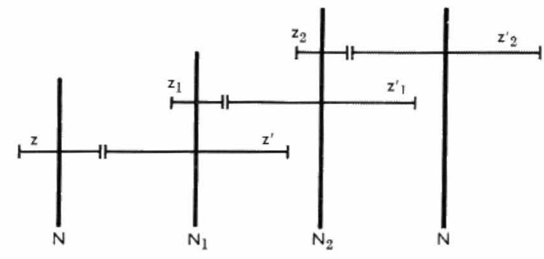


Fig. V-153 — Train d'engrenages

$$R = \frac{N'}{N} = \frac{z.z_1.z_2}{z'.z'_1.z'_2}$$

7.8.1. Réducteurs de vitesses. — Un train d'engrenages et son carter de protection, qui porte les paliers, constituent un réducteur. Avec un couple d'engrenages, on obtient couramment une raison R de valeur : $0{,}2 < R < 1$ (exceptionnellement $R = 0{,}04$ pour les réducteurs de turbine) ; avec deux couples (V. fig. V-139) : $0{,}04 < R < 0{,}2$ et avec trois couples : $0{,}008 < R < 0{,}04$. On utilise rarement des réducteurs à quatre couples pour obtenir des raisons plus petites ; on préfère associer un ou deux réducteurs à roue et vis sans fin avec un réducteur à trois couples (on arrive ainsi à des raisons inférieures à 0,04). Il faut noter que la raison d'un réducteur est unique et constante.

7.8.2. Boîtes de vitesses. — Une boîte de vitesses est constituée par une série de couples d'engrenages montée sur deux arbres parallèles et dont on peut choisir le couple en service et la raison correspondante. Différents dispositifs peuvent être utilisés pour changer de raison (on dit aussi changer de vitesse).

1° *Trains baladeurs.* — Dans ce dispositif, les pignons moteurs sont montés sur un même manchon coulissant de façon à avoir un déplacement axial tout en étant lié en rotation avec l'arbre (fig. V-154) ; cette liaison est réalisée

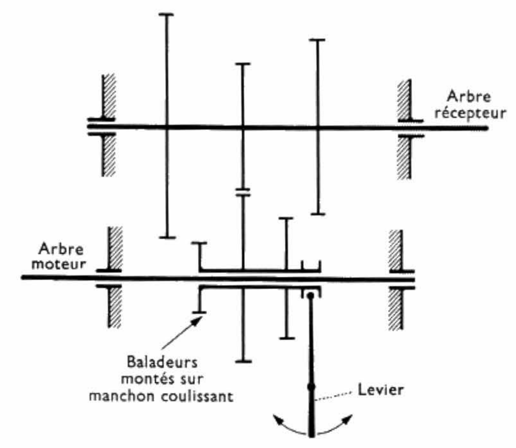


Fig. V-154 — Boîte de vitesses à train baladeur

le plus souvent par arbre et moyeu cannelés et chaque pignon peut ainsi engrener avec la roue correspondante calée sur l'arbre récepteur. La commande ne peut se faire qu'à l'arrêt (ou tout au plus sans couple, ce qui nécessite un embrayage associé à la boîte de vitesses). De plus, il est nécessaire de réaliser un point mort, les engrenages ne pouvant engrener que deux à deux. Les boîtes de vitesses à trains baladeurs ont donc l'inconvénient d'être encombrantes ; toutefois, elles sont simples et robustes. On les utilise dans les machines-outils pour toutes les puissances. Par suite de l'encombrement des trains baladeurs on ne dépasse pas trois vitesses avec un seul baladeur. Pour augmenter le nombre de vitesses on réalise des boîtes à deux et trois baladeurs.

2° *Crabots et synchronisateurs.* — Pour limiter l'encombrement en longueur, les pignons moteurs, toujours

en prise avec la roue correspondante, sont montés fous sur l'arbre moteur et accouplés temporairement avec lui par les crabots d'un moyeu cannelé (V. § 2.2). Pour égaliser la vitesse des crabots, avant le passage d'une vitesse en marche, on utilise des dispositifs appelés synchronisateurs dont les surfaces de friction ralentissent ou accélèrent l'arbre moteur isolé par l'engrenage débrayé. Ces dispositions sont universellement adoptées dans les boîtes de vitesses modernes des véhicules légers ou lourds, boîtes qui ont quatre ou cinq vitesses et qui peuvent même en comporter dix en associant une boîte à deux vitesses avec une boîte à cinq (poids lourds).

7.8.3. Trains épicycloïdaux. — Pour obtenir une réduction importante de la vitesse sous un faible encombrement tout en utilisant un nombre réduit de roues, on utilise une disposition particulière appelée train épicycloïdal. Un tel train (fig. V-155) est composé d'un pignon central moteur *(a)*, appelé planétaire, engrenant avec des satellites *(b)* et *(c)* tournant en roulant sur une roue fixe *(d)*. L'axe portant les satellites est appelé porte-train et est accouplé avec le récepteur. Les vitesses des roues de ce système sont liées par la formule de Willis :

$$\frac{\omega' - u}{\omega - u} = + R$$

dans laquelle R est la raison du train ; ω, la vitesse angulaire de la première roue menante ; ω', la vitesse angulaire de la dernière roue menée et u, la vitesse angulaire du porte-train. R est positif si les rotations extrêmes sont de même sens et négatif si elles sont en sens contraires. Le porte-train étant supposé fixe, la raison du train est égale à :

$$R = + \frac{Z_a \cdot Z_c}{Z_b \cdot Z_d}$$

On note que les nombres de dents des engrenages moteurs sont au numérateur.

Dans le cas de la figure V-155, R est négatif car les rotations extrêmes sont en sens contraires ; la vitesse angulaire ω' est nulle, l'engrenage *(d)* étant fixe, et la formule de Willis donne le rapport de transmission suivant :

$$\frac{u}{\omega} = \frac{R}{R + 1}$$

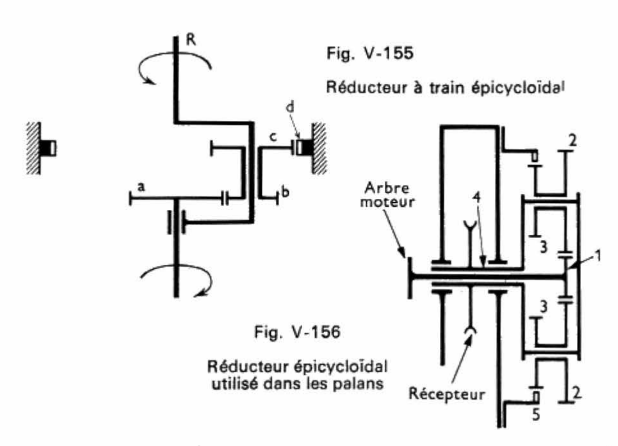


Fig. V-155

Réducteur à train épicycloïdal

Fig. V-156

Réducteur épicycloïdal utilisé dans les palans

1° *Application en levage.* — On utilise fréquemment une réduction par train épicycloïdal pour augmenter la capacité de levage sous un faible encombrement (fig. V-156). L'arbre moteur entraîne un pignon (1) qui engrène avec deux satellites (2). Les satellites (2) et (3), solidaires l'un de l'autre, sont montés fous sur un tourillon fixé sur un plateau solidaire de l'arbre récepteur (4). Le satellite (3) engrène avec une couronne dentée (5) fixée sur le bâti. Les satellites tournent sur leur axe par suite de l'entraînement de (2) par (1) ; mais (3), prenant appui sur la couronne fixe (5), roule sur celle-ci et entraîne le plateau porte-tourillons et, par suite, l'arbre récepteur (4) dans un mouvement de rotation. Pour des raisons d'équilibrage des efforts, on utilise deux groupes de satellites diamétralement opposés.

2° *Application dans l'automobile.* — Certaines boîtes de vitesses sont constituées par plusieurs trains épicycloïdaux successifs de raisons différentes, qui peuvent, soit tourner en bloc, la roue *(d)* étant rendue solidaire du porte-train, soit démultiplier, la roue *(d)* étant rendue solidaire du carter. C'est le principe des boîtes Cotal et Wilson.

Il faut aussi noter que le différentiel des ponts arrière est un cas particulier de train épicycloïdal à roues coniques.

3° *Application aux transmissions.* — Les poulies Redex (Société industrielle de transmissions) utilisent une réduction par train épicycloïdal. Le corps (8) de la poulie (fig. V-157), entraîné dans la plupart des cas par des courroies trapézoïdales, porte les axes de satellites (5). Une série de satellites (2) roule sur un planétaire (1), immobilisé en rotation par un bras de réaction (11) lié à un point fixe. La deuxième série de satellites (2') entraîne à son tour le deuxième planétaire (1'), solidaire du moyeu (3), lequel est claveté sur l'arbre de la machine. Dans ces

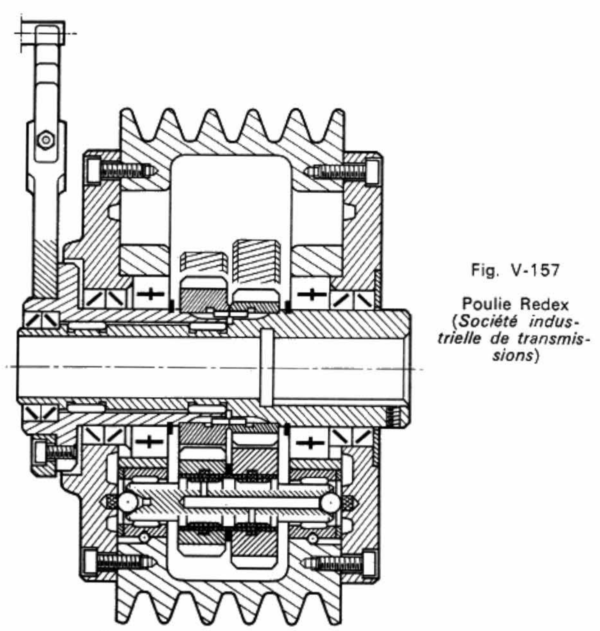


Fig. V-157

Poulie Redex (*Société industrielle de transmissions*)

conditions le rapport de réduction entre la vitesse du corps et la vitesse de l'arbre est fonction de la différence des diamètres des satellites. Cette réduction est d'autant plus forte que cette différence de diamètre est plus faible. Ce rapport de réduction, désigné par la lettre K, est donné par la formule suivante :

$$K = \frac{1}{1 - R}$$

R étant la raison du train épicycloïdal.

Il faut signaler une disposition originale utilisée dans ces poulies : les axes de satellites comportent des dentelures taillées qui offrent, par leur relief, une prise au matériau thermoplastique (injecté) qui assure la liaison avec les satellites. Ce système (breveté) assure par son élasticité

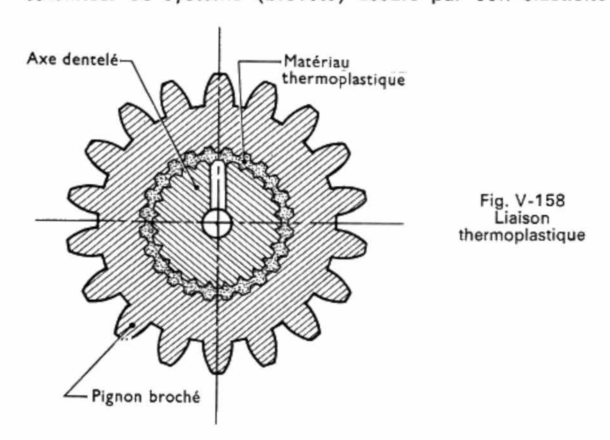


Fig. V-158

Liaison thermoplastique

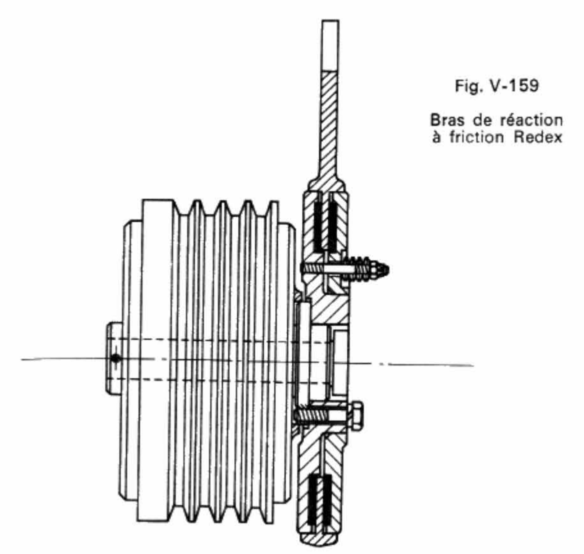


Fig. V-159

Bras de réaction à friction Redex

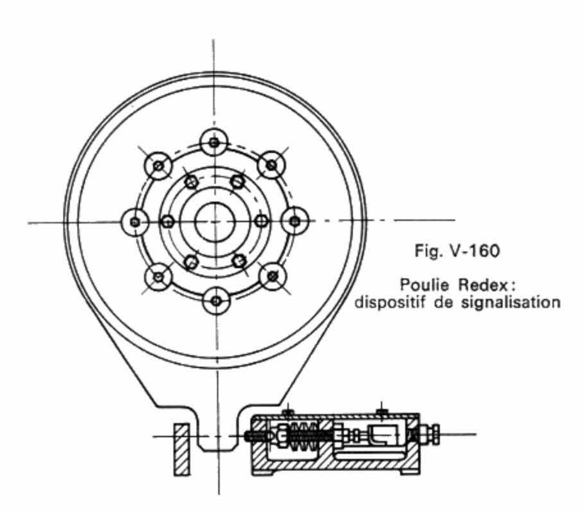


Fig. V-160

Poulie Redex : dispositif de signalisation

une répartition des efforts entre tous les satellites (fig. V-158). Il faut signaler aussi l'utilisation du bras de réaction comme limiteur de couple protégeant le moteur des surcharges dues au fonctionnement de la machine (fig. V-159) et la possibilité de signalisation à distance correspondante, le point fixe étant alors remplacé par un ressort solidaire d'un contacteur (fig. V-160).

CHAPITRE VI
TRANSFORMATIONS DES MOUVEMENTS

Le système bielle-manivelle permet la transformation du mouvement circulaire continu (rotation) en mouvement rectiligne alternatif (va-et-vient) et la transformation inverse. Les cames ne permettent que la première transformation.

Dans un mouvement rectiligne alternatif, un mobile change de sens à chaque extrémité de son déplacement et il est soumis à des efforts d'inertie importants. Les accélérations correspondantes sont déterminées par l'étude cinématique du système étude qui est indispensable pour pouvoir calculer les dimensions des organes.

Pignon et crémaillère permettent aussi les deux transformations mais la rotation du pignon est limitée par la longueur de la crémaillère. Ce dispositif est réservé aux mouvements lents de réglage (commande de vanne, direction de véhicule) et son dimensionnement est un calcul d'engrenages.

1. SYSTÈME BIELLE-MANIVELLE

1.1. Généralités. — Dans ce système, le mouvement rectiligne alternatif est celui d'un coulisseau guidé par des glissières ou celui d'un piston guidé par un cylindre. L'étude ci-après est limitée à ce dernier cas qui est le plus fréquent (moteurs thermiques, pompes et compresseurs) mais les calculs correspondants sont applicables à tous les systèmes bielle-manivelle.

Dans l'ensemble piston-bielle-manivelle (fig. VI-1), le piston, cylindrique, se déplace dans le cylindre suivant son axe *Oy*. Le déplacement ou course de ce piston est limité à la longueur du cylindre dont une des extrémités est obturée par un fond. Ce fond crée une chambre à volume variable. Toute augmentation de pression dans cette chambre entraîne un déplacement du piston. Inversement, à tout déplacement du piston correspond une variation de volume et de pression dans la chambre. La bielle, articulée en *B* sur le piston (pied de bielle, axe de piston) et en *A* sur la manivelle (tête de bielle, maneton de la manivelle), assure la liaison de ces deux organes. La manivelle, appelée aussi vilebrequin, est un arbre coudé qui peut tourner autour de l'axe *Oz* défini par ses deux tourillons (*Oz* est perpendiculaire à *Oy*).

Si on exerce un couple moteur sur l'arbre *Oz* de la manivelle entraînant celle-ci en rotation, il s'en suit un déplacement rectiligne du piston suivant son axe donc une compression du fluide dans la chambre. Réciproquement, à la détente du fluide dans le cylindre correspond une rotation de la manivelle autour de l'axe *Oz*. Le système étant réversible, on l'utilisera tantôt dans le sens fluide moteur arbre récepteur (moteurs à explosion, machines à vapeur) tantôt dans l'autre sens (pompes, compresseurs).

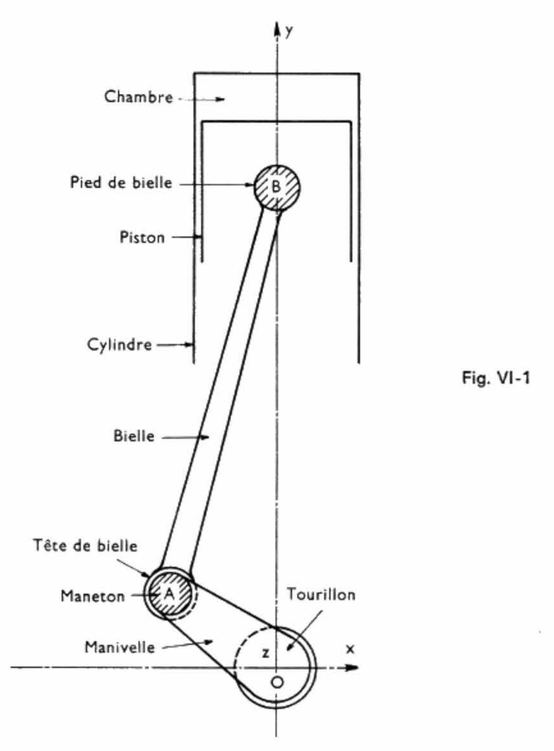


Fig. VI-1

1.2. Étude cinématique

1.2.1. Notations (fig. VI-2). — Le trièdre de référence (O, x y z) est défini par l'axe Oy du cylindre et par l'axe Oz des tourillons de la manivelle. L'angle θ de la manivelle avec Oy est compté positivement dans le sens trigonométrique : $\theta = \omega t$ (ω est la vitesse angulaire de la manivelle autour de l'axe Oz et t est le temps). On néglige les variations cycliques de la vitesse angulaire et on admet que ω est constante ; φ, angle qui amène BO sur BA compté positivement dans le sens trigonométrique, est négatif pour $0 < \theta < \pi$ et positif pour $\pi < \theta < 2\pi$; on a toujours $\varphi < \frac{\pi}{2}$, d'où : $\cos \varphi > 0$.

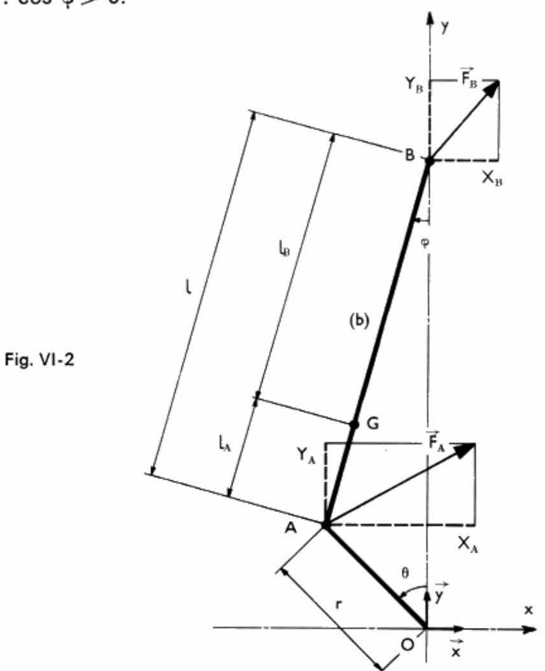


Fig. VI-2

On note r le rayon OA de la manivelle, l la longueur AB de la bielle et λ leur rapport. L'élongation du piston est $y = OB$.

Une relation entre θ et φ s'obtient en projetant le contour OAB sur Ox :

$$\sin \varphi = -\lambda \sin \theta \qquad (1)$$

Les valeurs extrêmes de φ sont donc obtenues pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $\theta = \frac{3\pi}{2}$.

L'étude cinématique permet de déterminer l'élongation y, la vitesse y' et l'accélération y'' du piston, l'angle φ, la vitesse angulaire φ' et l'accélération angulaire φ'' de la bielle.

1.2.2. Bielle. — En différentiant la relation (1) par rapport au temps, et en tenant compte de (1), on obtient la vitesse angulaire de la bielle :

$$\varphi' = \frac{d\varphi}{dt} = -\lambda\omega \frac{\cos \theta}{\cos \varphi} = \omega \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \theta} \qquad (2)$$

φ' est nulle pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $\theta = \frac{3\pi}{2}$.

Les valeurs extrêmes sont obtenues aux points morts (extrémités de la course du piston) pour $\theta = 0$ et $\theta = \pi$; dans ces deux cas $\varphi' = -\lambda\omega$.

En différentiant une seconde fois (1), et en tenant compte de (1), on obtient l'accélération angulaire de la bielle :

$$\varphi'' = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \omega^2 . \operatorname{tg} \varphi \left[\left(\frac{\varphi'}{\omega}\right)^2 - 1\right] \qquad (3)$$

φ'' est nulle pour $\theta = 0$ et $\theta = \pi$, donc aux points morts où φ' est maximale en valeur absolue. Les valeurs extrêmes sont obtenues pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $\theta = \frac{3\pi}{2}$, c'est-à-dire quand φ' s'annule ; dans les deux cas : $\varphi'' = -\omega^2 \operatorname{tg} \varphi$.

1.2.3. Piston. — En projetant le contour OAB sur Oy et en tenant compte de (1), on obtient l'élongation du piston :

$$y = r \frac{\sin (\varphi - \theta)}{\sin \varphi} \qquad (4)$$

En dérivant (4) par rapport au temps on obtient la vitesse du piston :

$$y' = \omega r \frac{\sin (\varphi - \theta)}{\cos \varphi} \qquad (5)$$

Elle est maximale en valeur absolue lorsque la bielle est sensiblement perpendiculaire à la manivelle.

En dérivant une seconde fois et compte tenu de (1), on obtient l'accélération du piston :

$$y'' = -\omega^2 r \left[\frac{\cos (\varphi - \theta)}{\cos \varphi} + \lambda \frac{\cos^2\varphi}{\cos^3\varphi}\right] \qquad (6)$$

Ses valeurs extrêmes correspondent aux points morts, soit pour $\theta = 0$:

$$y'' = -\omega^2 r \ (1 + \lambda)$$

et pour $\theta = \pi$:

$$y'' = \omega^2 r \ (1 - \lambda)$$

1.3. Étude mécanique. — Les éléments de réduction des actions mécaniques appliquées au maneton du vilebrequin se réduisent au niveau de l'axe de rotation, à une force et un moment qui sont fonction des masses des pièces en mouvement ainsi que de leurs accélérations. Pour les moteurs à combustion interne en particulier et pour toutes les machines alternatives en général, il est important de connaître la valeur de ce moment pour chaque angle de rotation afin de vérifier que le vilebrequin est correctement dimensionné pour résister aussi bien à ce moment qu'aux harmoniques excitateurs qu'il développe. Pour calculer ce moment, il est nécessaire de déterminer les actions mécaniques appliquées à la tête et au pied de la bielle. Ces actions mécaniques forment un torseur dont les éléments de réduction au centre d'inertie de la bielle sont égaux, à tout instant, aux éléments de réduction du torseur des quantités d'accélération.

1.3.1. Mise en équation. — On isole la bielle (b) : les pièces voisines (piston et maneton) sont remplacées par les forces qu'elles exercent sur celle-ci (fig. VI-2), soit $\overrightarrow{F_A}$ au point A et $\overrightarrow{F_B}$ au point B. On suppose que les articulations sont sans frottement et que le poids propre de la bielle est négligeable devant les autres efforts. Les axes de référence sont Ox et Oy, de vecteurs unitaires x et y ; le paramètre est θ angle de rotation du vilebrequin, et pour des commodités de calcul on utilise aussi l'angle φ relié à θ par la relation (1).

Soit $m_b . \vec{\Gamma}(G)$ et $\vec{\delta}_G(b)$ les éléments de réduction du torseur des quantités d'accélération de la bielle en G, centre d'inertie de la bielle (qui est aussi son centre de gravité) ; m_b étant la masse de la bielle ; X_A, Y_A, X_B et Y_B les projections de $\overrightarrow{F_A}$ et $\overrightarrow{F_B}$ sur les axes Ox et Oy ; les relations vectorielles traduisant les lois de la mécanique rationnelle sont :

$$m_b . \vec{\Gamma}(G) = (X_A + Y_B) . \vec{x} + (Y_A + Y_B) . \vec{y} \qquad (7)$$

$$\vec{\delta}_G(b) = \overrightarrow{GA} \wedge \overrightarrow{F_A} + \overrightarrow{GB} \wedge \overrightarrow{F_B} \qquad (8)$$

La relation (7), projetée sur les axes Ox et Oy, donne deux équations :

$$m_b . \vec{\Gamma}(G) \bullet \vec{x} = X_A + X_B \qquad (9)$$

$$m_b . \vec{\Gamma}(G) \bullet \vec{y} = Y_A + Y_B \qquad (11)$$

Les forces $\overrightarrow{F_A}$ et $\overrightarrow{F_B}$ sont situées dans le plan de symétrie de la bielle et leur moment par rapport G, point de ce plan, est parallèle à Oz ; la relation (8) ne donne donc qu'une seule équation :

$$\vec{\delta}_G(b) \bullet \vec{z} = (\overrightarrow{GA} \wedge \overrightarrow{F_A}) \bullet \vec{z} + (\overrightarrow{GB} \wedge \overrightarrow{F_B}) \bullet \vec{z} \qquad (12)$$

La quatrième équation est obtenue en considérant le piston isolé (fig. VI-3) ; les efforts qui lui sont appliqués (en négligeant son poids propre) sont : $- P . \vec{y}$, résultante des pressions dues à l'évolution thermodynamique de la masse de gaz enfermée (on suppose que son support

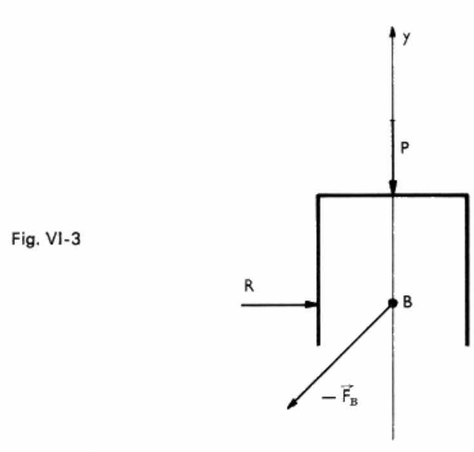


Fig. VI-3

passe par B), $-\overrightarrow{F_B}$, action de la bielle sur le piston et R, action du cylindre sur le piston (on suppose que son support passe par B). La relation vectorielle de la dynamique appliquée au piston de masse m_p, donne, en projection sur l'axe Oy:

$$m_p \cdot \vec{\Gamma}(B) \bullet \vec{y} = -\overrightarrow{F_B} \bullet \vec{y} - P$$

$$m_p \cdot y'' = -Y_B - P \qquad (12)$$

Les équations (9), (10), (11) et (12) constituent un système de quatre équations à quatre inconnues qui permettent de calculer les composantes de $\overrightarrow{F_A}$ et $\overrightarrow{F_B}$ si $\vec{\Gamma}(G)$, $\vec{\delta}_G(b)$ et P sont connus.

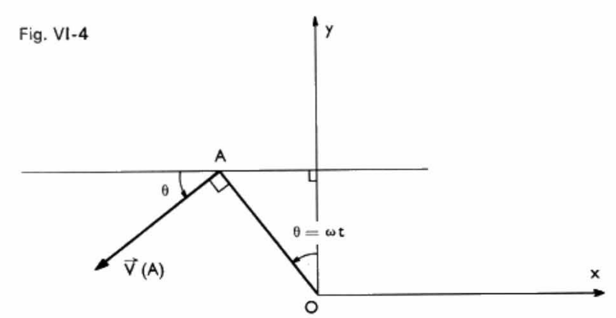
1.3.2. Accélération du centre d'inertie G. — Par définition l'accélération du centre d'inertie G est la dérivée de la vitesse de G par rapport au temps. Le champ des vitesses d'un solide étant un champ de vecteurs équiprojectifs, on peut appliquer la relation suivante entre les éléments de ce champ : $\vec{V}(G) = \vec{V}(A) + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{AG}$,

avec $\vec{\Omega} = \varphi'\vec{z}$, vecteur rotation de la bielle, $\vec{V}(G)$ vitesse de G et $\vec{V}(A)$ vitesse de A.

La vitesse du point A lié à la bielle est égale à la vitesse du point A lié au maneton (fig. VI-4). D'où :

$$\vec{V}(A) = -(\omega r \cos\theta)\,\vec{x} - (\omega r \sin\theta)\,\vec{y}$$

Fig. VI-4



D'après la figure VI-2, on a :

$$\overrightarrow{AG} = l_A . \sin\varphi . \vec{x} + l_A . \cos\varphi . \vec{y}$$

La vitesse du point G est donc :

$$\vec{V}(G) = -(\omega r \cos\theta)\vec{x} - (\omega r \sin\theta)\vec{y}$$
$$+ \varphi'\vec{z} \wedge (l_A . \sin\varphi . \vec{x'} + l_A . \cos\varphi . \vec{y})$$
$$= (-\omega r \cos\theta - \varphi' \, l_A . \cos\varphi)\vec{x}$$
$$+ (-\omega r \sin\theta + \varphi' l_A \sin\varphi) . \vec{y}$$

En dérivant le vecteur $V(G)$ par rapport au temps, ce qui est possible car ce vecteur a ses composantes exprimées dans un référentiel fixe, et comme ω est constante, on obtient :

$$\vec{\Gamma}(G) = (\omega^2 r \sin\theta - \varphi'' l_A \cos\varphi + \varphi'^2 l_A \sin\varphi)\vec{x}$$
$$+ (-\omega^2 r \cos\theta + \varphi'' l_A \sin\varphi + \varphi'^2 \, l_A \cos\varphi)\,\vec{y}$$

1.3.3. Moment dynamique de la bielle. — Par définition le moment dynamique de la bielle en G est égal à la dérivée par rapport au temps de son moment cinétique en G. Celui-ci a pour expression :

$$\mu_G(b) = I_{G,\ x_b\ y_b\ z_b}$$

I désignant le tenseur d'inertie relatif à la bielle par rapport au trièdre $(G, x_b\ y_b\ z_b)$ lié à celle-ci (fig. VI-5). Soit

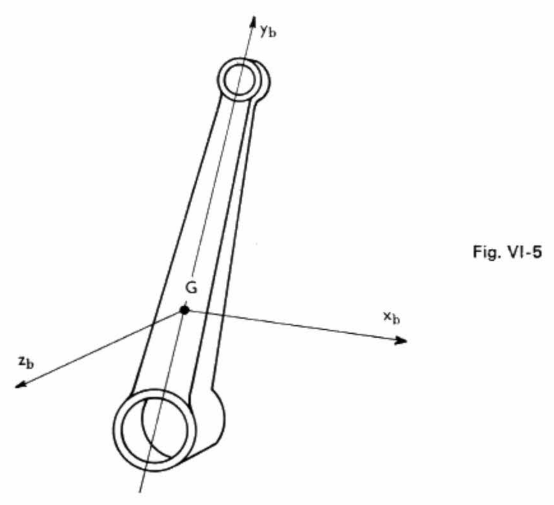


Fig. VI-5

I, J et K les moments d'inertie de la bielle par rapport aux axes Gx_b, Gy_b et Gz_b. La bielle admettant deux plans de symétrie $(x_b\ Gy_b)$ et $(y_b\ Gz_b)$, les produits d'inertie L et N relatifs à ces plans sont nuls. Soit M le produit d'inertie relatif au plan $(z_b\,Gx_b)$. On a :

$$\vec{\mu}_G\ (b) = \begin{vmatrix} I & -L & 0 \\ -L & J & 0 \\ 0 & 0 & K \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0_{\rightarrow} \\ \varphi' . \vec{z_b} \end{vmatrix} = K . \varphi' . \vec{z_b}$$

En dérivant $\mu_G(b)$ par rapport au temps dans le référentiel fixe, car $z_b = z$, on a :

$$\vec{\delta}_G(b) = K . \varphi'' . \vec{z}$$

1.3.4. Valeurs des forces $\overrightarrow{F_A}$ et $\overrightarrow{F_B}$. — Étant donné les moments de $\overrightarrow{F_A}$ et $\overrightarrow{F_B}$ par rapport à G :

$$\overrightarrow{GA} \wedge \vec{F}_A = (Y_A\, l_A \sin\varphi + X_A l_A \cos\varphi) . \vec{z}$$
$$\overrightarrow{GB} \wedge \vec{F}_B = (Y_B\, l_B \sin\varphi - X_B l_B \cos\varphi)\, \vec{z}$$

et les expressions de $\vec{\Gamma}(G)$, $\vec{\delta}_G(b)$ et $\vec{\Gamma}(B)$ ci-dessus, le système des quatre équations (9), 10, (11) et (12) s'écrit :

$$m_b\,(\omega^2 r \sin\theta - \varphi''\, l_A \cos\varphi + \varphi'^2\, l_A \sin\varphi) = X_A + X_B \quad \text{(I)}$$
$$m_b(-\omega^2 r \cos\theta + \varphi'' l_A \sin\varphi + \varphi'^2 l_A \cos\varphi) = Y_A + Y_B \quad \text{(II)}$$
$$K\varphi'' = \sin\varphi\,(l_B\, Y_B - l_A\, Y_A) - \cos\varphi\,(l_A X_A + l_B X_B) \quad \text{(III)}$$
$$-m_p\,\omega^2 r \left[\frac{\cos(\varphi - \theta)}{\cos\varphi} + \lambda \frac{\cos^2\theta}{\cos^3\theta}\right] = -Y_B - P \quad \text{(IV)}$$

Si P résultante des pressions sur le piston est connue en fonction de θ, ce système permet de déterminer les composantes de $\overrightarrow{F_A}$ et de $\overrightarrow{F_B}$ en fonction de θ et de ω, l'équation (IV) donnant Y_B, l'équation (II) Y_A et les équations (I) et (III) X_A et X_B. Avec ces valeurs on peut alors vérifier le dimensionnement de la manivelle, compte tenu de l'accélération centripète de son mouvement de rotation. Pour le piston et pour la bielle (V. § 1.5.1), il faut aussi tenir compte de leurs accélérations respectives.

Remarque : il est important de noter que les efforts subis par les organes du système bielle-manivelle sont proportionnels à ω^2.

1.4. Piston

1.4.1. Définition. — On désigne sous le nom général de piston tout organe obturateur se déplaçant alternativement dans un cylindre qu'il divise en deux compartiments où les pressions sont différentes. Lorsque l'action du fluide a lieu sur les deux faces du piston, celui-ci est dit à double effet et lorsqu'elle a lieu sur une seule face, celui-ci est dit à simple effet.

On distingue trois éléments dans un piston : le corps, les garnitures et la tige. Cette dernière est supprimée dans un grand nombre de cas, la bielle étant alors directement articulée sur le piston. L'étanchéité entre piston et cylindre est assurée par les garnitures appelées également segments dans le cas de petits diamètres.

1.4.2. Pistons pour moteurs thermiques. — Dans les moteurs à combustion interne, tels que les moteurs à essence et les moteurs Diesel, le piston constitue le fond mobile de la chambre de combustion. Il se compose (fig. VI-6) d'une tête qui porte les segments d'étanchéité et qui

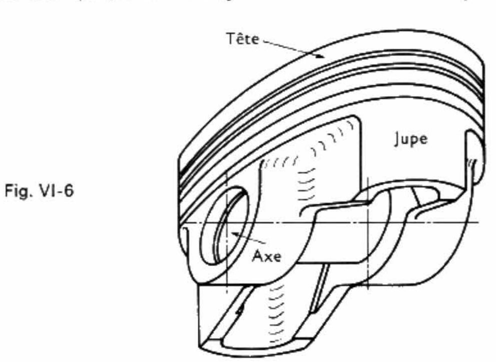


Fig. VI-6

est en contact avec les gaz chauds, d'une jupe qui assure le guidage dans la chemise (cylindre) et d'un axe sur lequel s'articule la bielle. Ses fonctions fondamentales sont la réception et la transmission de la pression motrice développée par la combustion, l'étanchéité au fluide moteur et au fluide lubrifiant (segments) ainsi que le guidage du pied de bielle dans l'axe du cylindre. Ces fonctions doivent être assurées avec la plus grande sécurité possible, résultat qui serait facile à obtenir si le piston n'était le siège d'aucun phénomène thermique. Or, la tête est portée à haute température (250 à 300 °C) et une certaine quantité de chaleur est transmise à la chemise (par l'intermédiaire des segments et de la jupe) et à l'huile de graissage du moteur par l'intérieur du piston en contact avec le brouillard d'huile qui règne dans le carter. L'existence de ces phénomènes donne toute sa complexité au problème et fait que le piston est un des organes les plus délicats du moteur. Il a donc subi, depuis la création du moteur à explosion, des modifications constantes destinées à améliorer son fonctionnement.

Les principales qualités demandées aux matériaux pour piston peuvent se résumer ainsi : bonne conductivité thermique, caractéristiques mécaniques encore élevées à la température de 300 °C, bonne résistance à la corrosion par les gaz chauds, faible dilatibilité pour réduire les jeux à froid, masse volumique réduite, bonne tenue à l'usure, bonne coulabilité et usinage facile.

1° *Pistons pour moteurs à essence.* — Les pistons en alliage d'aluminium sont universellement employées depuis de nombreuses années. La maison Chenard et Walker fut une des premières, en France, à équiper ses voitures avec des pistons en alliage d'aluminium dès les années 1912. L'emploi d'alliage d'aluminium a pour but de diminuer la masse de l'équipage mobile (bielle et piston) afin de perturber le moins possible le couple moteur. L'étude du comportement thermique du piston n'a véritablement commencé qu'après 1918. À l'avantage que présente les alliages d'aluminium au point de vue masse volumique (2,7 kg/dm^3) par rapport aux fontes ou aux aciers (7,8 kg/dm^3), il faut opposer un désavantage très sérieux dû au fort coefficient de dilatation de ces alliages (18 à $23 . 10^{-6}$ °C^{-1}). Ce défaut est particulièrement sensible au niveau du guidage. En effet, la chemise est dans la plupart des cas en fonte, dont le coefficient de dilatation est plus faible ($11 . 10^{-6}$ °C^{-1}). Il en résulte une diminution des jeux lorsque la température s'élève. Ce défaut serait relativement mineur si la dilatation du piston était identique dans toutes les directions. Or, il n'en est rien, car son architecture est relativement complexe et son épaisseur n'est pas constante. De plus, les températures, différentes en chaque point, varient dans le temps. Aussi les parties massives (telles que les bossages supportant l'axe), qui ont une grande capacité calorifique, se dilatent beaucoup plus que les parties de faible épaisseur (bas de jupe). Le premier remède technologique apporté à ce problème fut l'introduction de plaquettes en acier entourant le bossage ; de cette manière, on alliait la bonne conductivité thermique et le faible poids des métaux légers à la faible dilatation de l'acier. La mise au point de tels pistons est due aux États-Unis d'Amérique à A.L. Nelson qui, dès 1926, fabriqua le piston Nelson Bonalite avec plaquettes en invar (36 % de nickel) contrôlant la dilatation. Plus tard, on a pu obtenir un contrôle de la dilatation avec des plaquettes en acier non allié, grâce à l'action bimétallique. D'autres dispositifs, tels que des anneaux en acier, noyés dans le piston au niveau des bossages sont encore employés.

Actuellement la plupart des pistons sont monométalliques, c'est-à-dire entièrement réalisés dans le même alliage. Les problèmes de guidage et de dilatation (différente suivant le point de la jupe considéré) sont alors résolus par usinage particulier de la jupe. On donne à celle-ci une forme à froid qui tient compte de la dilatation à chaud de chaque point et telle que la jupe soit cylindrique à chaud. Pour définir la surface de la jupe à froid, on trace un profil méridien (b, fig. VI-7 et c, fig. VI-8) et un profil polaire (d, fig. VI-7). On définit ainsi tous les points constitutifs

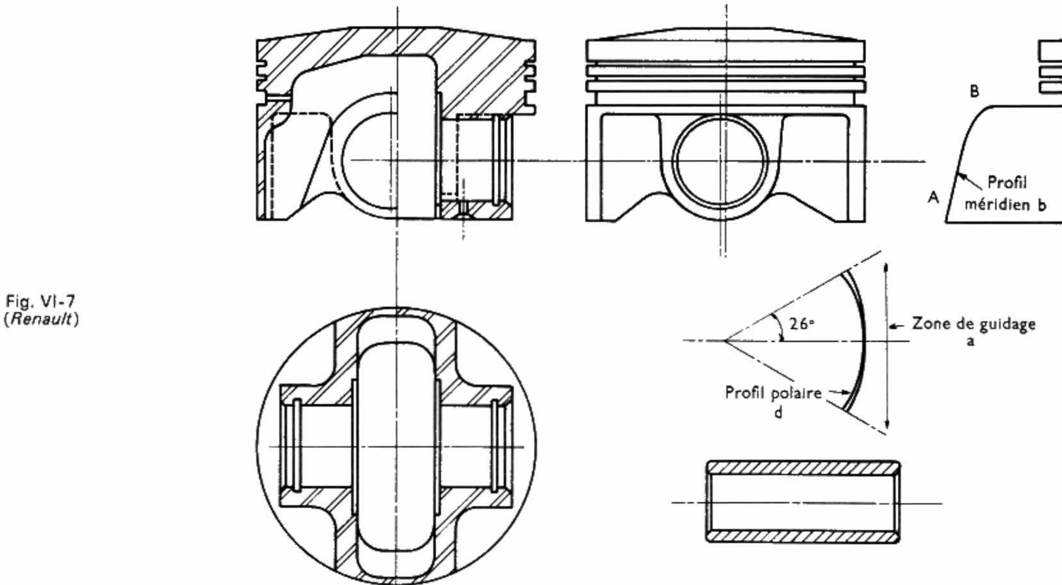
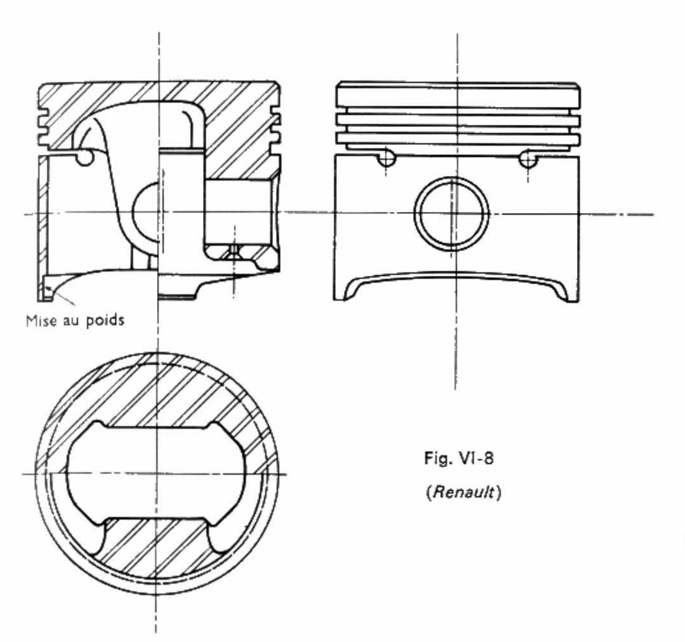


Fig. VI-7
(*Renault*)



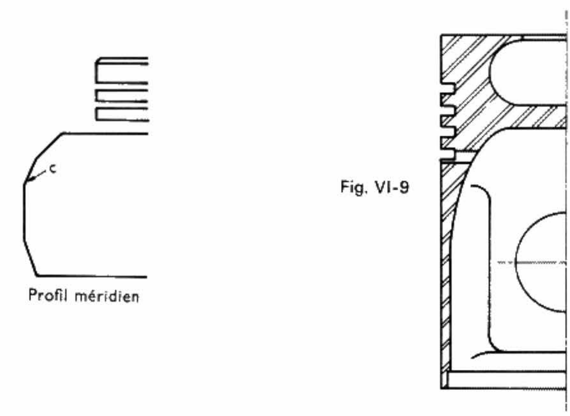


Fig. VI-9

Fig. VI-8
(*Renault*)

de la surface dont le point *i* est un point courant. Les courbes des profils méridiens et des profils polaires sont déterminées expérimentalement. La fonction guidage étant assurée par la jupe seule, la tête n'est pas en contact avec la paroi de la chemise; on l'usine soit conique soit cylindrique, en vérifiant qu'à chaud (après dilatation) le jeu est suffisant pour qu'il n'y ait pas contact. Pour les pistons d'automobiles on sépare généralement la tête de la jupe (fig. VI-8 : piston de Renault 16). Pour les moteurs de voitures de compétition, beaucoup plus sollicités, la jupe n'est pas séparée de la tête (fig. VI-7) et elle est limitée à la seule zone de guidage *a* indispensable (allégement maximal). L'étanchéité est réalisée par des segments en fonte qui sont des anneaux élastiques fendus, logés dans les gorges de la tête. Généralement au nombre de trois, leurs dimensions sont réduites au maximum, surtout en épaisseur et ils sont disposés le plus près possible de l'axe pour réduire la masse de la tête. Le segment inférieur racle l'huile sur la paroi de la chemise pour éviter sa carbonisation par les gaz chauds. Actuellement, les pistons de moteurs pour voitures de compétition n'ont que deux segments afin de réduire le plus possible les dimensions de ces pistons et par conséquent leur masse.

Comme alliages d'aluminium, on emploie depuis longtemps, en Europe, les alliages au silicium qui s'adaptent parfaitement aux exigences de la construction des pistons. On utilise le plus souvent un alliage eutectique (11 à 13 % de silicium) auquel on ajoute du nickel et du cuivre pour augmenter sa résistance à chaud et du magnésium afin de pouvoir le tremper (par exemple : A-S12UN).

2° *Pistons pour moteurs Diesel.* — Par comparaison avec ceux employés dans les moteurs à essence, on peut dire que ces pistons sont des pistons monométalliques à tête et jupe longues non séparées. En effet, c'est le type de pistons qui convient le mieux pour supporter les charges importantes dues à la pression de combustion élevée du cycle Diesel; par ailleurs il permet un écoulement efficace de la chaleur. Le facteur prépondérant qui détermine la forme de ces pistons est l'importance du flux de chaleur reçu par la tête. Si la température de la tête est trop élevée, ses effets pernicieux se manifestent, d'une part, dans les premières gorges de segments, par le gommage des segments et l'usure des flancs de gorges, d'autre part, sur la tête elle-même (surtout dans le cas de chambre de combustion incorporée) par des fissurations dues aux contraintes thermiques et même parfois, par des fusions locales. De nombreuses dispositions constructives sont adoptées par les constructeurs pour limiter la température de la tête; les plus courantes sont :

— Un tracé favorable à l'écoulement de la chaleur (fig. VI-9), l'épaisseur de la paroi diminuant progressivement de la tête à la jupe. Ce type de piston convient très bien pour les moteurs Diesel non suralimentés ou légèrement suralimentés.

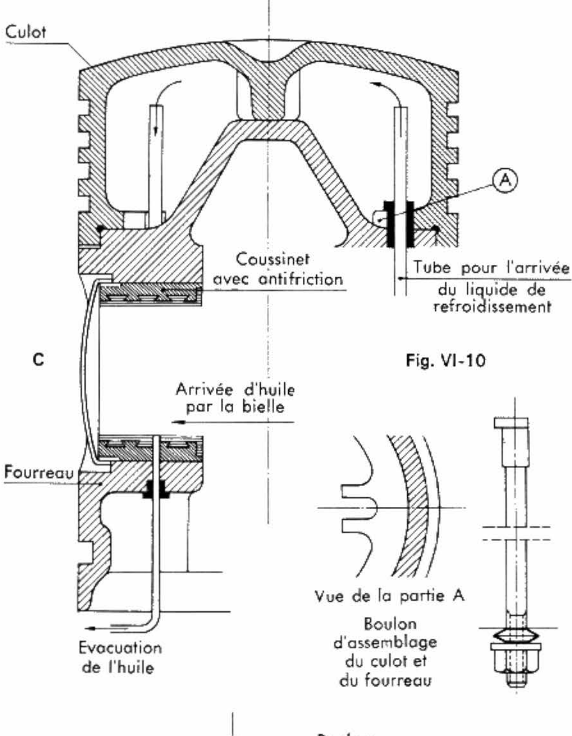
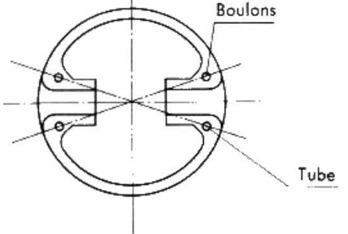


Fig. VI-10



Coupe C dans le plan de l'axe du piston

— Un refroidissement par l'huile du moteur, soit en arrosant les parois intérieures de la tête à partir de gicleurs placés sur le bâti, soit en créant une circulation d'huile dans la tête. La cavité à l'intérieur de la tête est alors directement obtenue par moulage (fig. VI-10) ou réalisée grâce à un fond rapporté (V. fig. VI-11).

— Un refroidissement par eau, ce mode de refroidissement étant réservé aux pistons de très gros moteurs lents (Diesel marin : V. fig. VI-12).

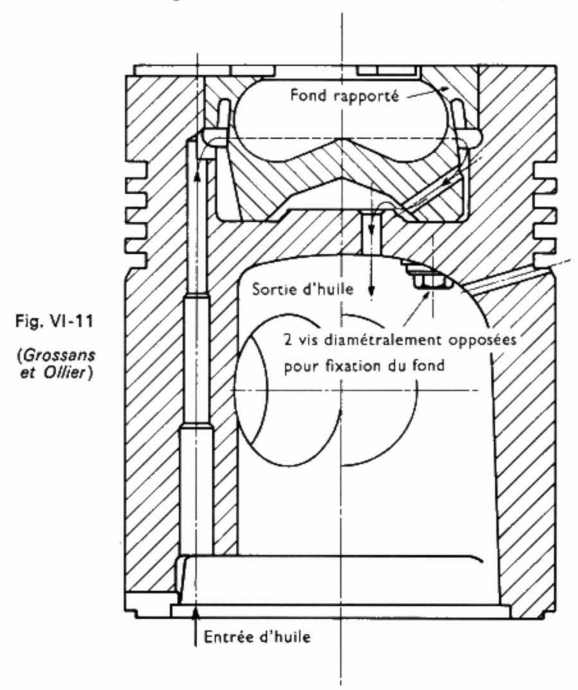


Fig. VI-11

(*Grossans et Ollier*)

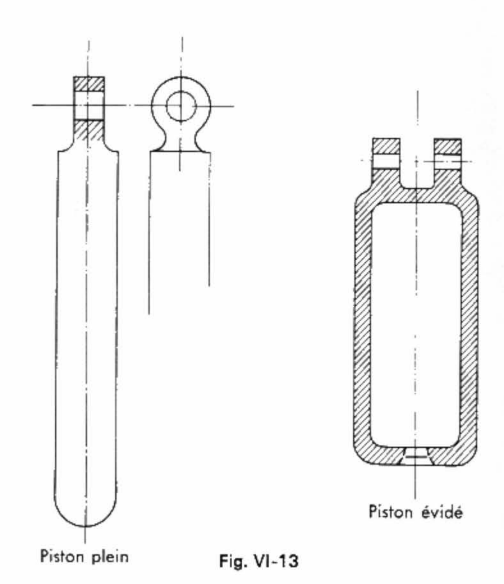


Fig. VI-13

1.4.3. Pistons pour pompes et compresseurs

1° *Piston plongeur* (fig. VI-13). — Réservé aux liquides, il peut être constitué par une simple barre d'acier lorsqu'il est de faible section et sa longueur peut atteindre dix fois son diamètre. Lorsque sa section est importante, il est réalisé par moulage afin, en évidant l'intérieur, d'obtenir un allégement important. Sa longueur dépasse alors rarement deux fois et demie son diamètre. Le guidage peut être obtenu soit directement par le dispositif d'étanchéité, soit par un dispositif annexe tel qu'une bague en bronze emmanchée dans le cylindre ou un guidage extérieur. Les garnitures pour pistons plongeurs sont généralement portées par le cylindre. Le choix de leur matériau est fonction de la nature et de la température du liquide à véhiculer: pour de l'eau dont la température est inférieure à 30 °C, on utilise le cuir gras embouti.

2° *Piston à plateau.* — Il se réduit à un disque support de garnitures monté sur une tige et présente, par rapport au piston plongeur, l'avantage d'une masse plus faible à même diamètre de cylindre. Les garnitures sont en cuir gras embouti (fig. VI-14) pour véhiculer de l'eau froide; ce sont des segments continus en bois pour les pompes de condenseur et des segments fendus en fonte pour les compresseurs d'air. Ces segments sont alors montés dans des gorges.

3° *Piston fourreau.* — De même forme générale qu'un piston de moteur thermique, il est en fonte et peut comporter plusieurs diamètres et autant de jeux de segments Il convient en particulier aux compresseurs de gaz à un ou plusieurs étages.

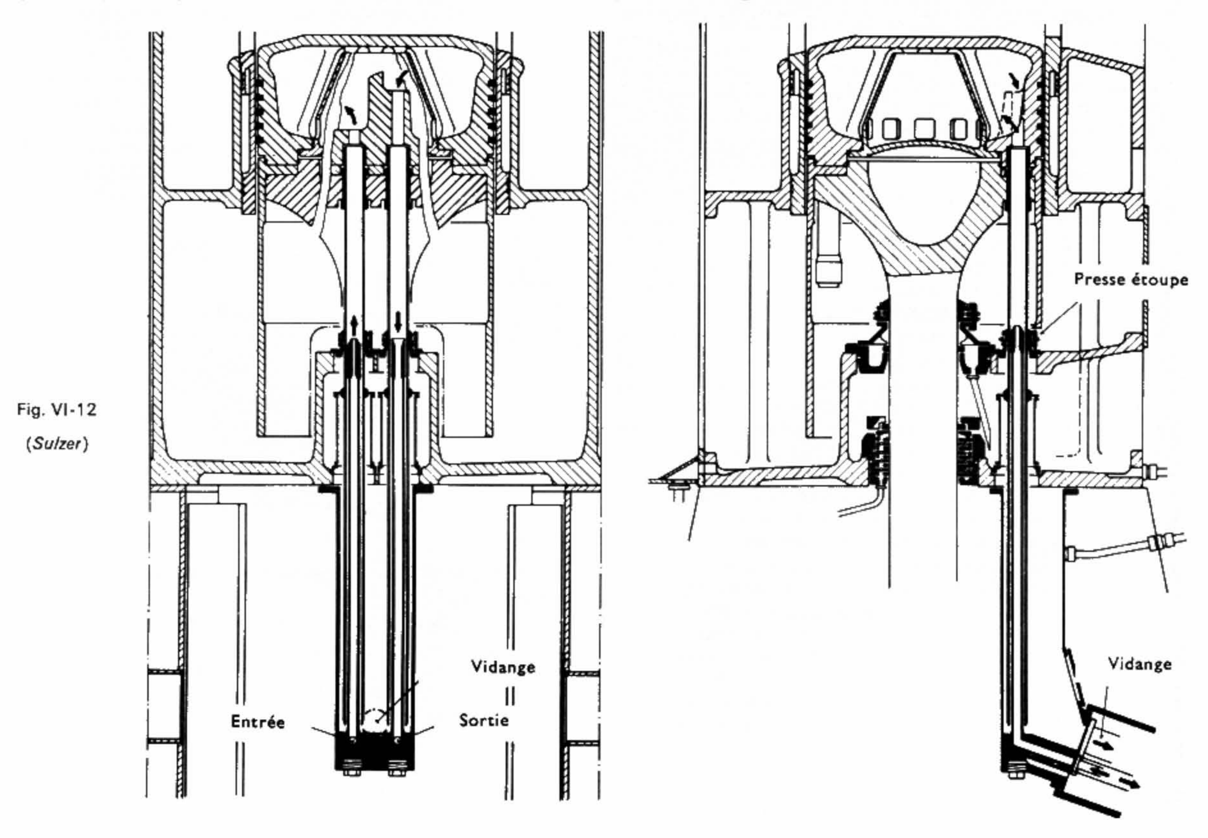


Fig. VI-12

(*Sulzer*)

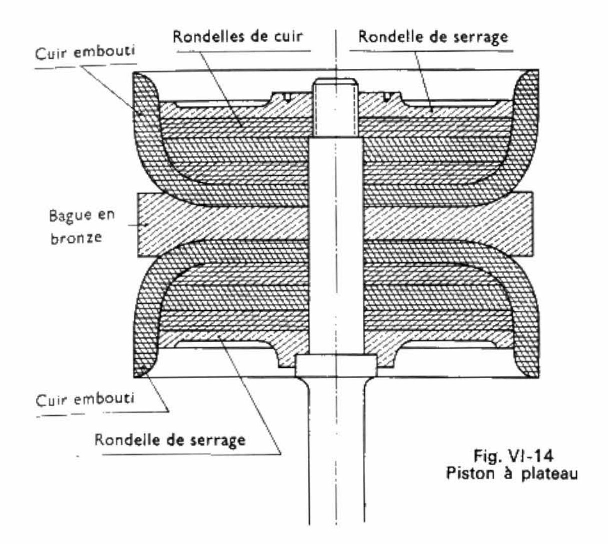


Fig. VI-14
Piston à plateau

4° *Piston sans garniture.* — Il réalise lui-même l'étanchéité par son contact avec le cylindre. Cette réalisation exige un piston parfaitement ajusté et rodé dans le cylindre (jeu de quelques micromètres). Elle convient pour de très petits diamètres et des matériaux (piston et cylindre) de coefficient de dilatation voisin. Elle est essentiellement employée pour les pompes d'injection des moteurs à combustion interne (Diesel ou essence).

1.5. Bielle

1.5.1. Fonctions et sollicitations. — La bielle assure deux fonctions essentielles : d'une part, la liaison mécanique (transmission des forces) entre la manivelle et le piston, d'autre part, la liaison cinématique entre l'organe en mouvement rectiligne alternatif (le piston) et l'organe en mouvement circulaire (la manivelle).

La bielle a toujours un mouvement plan dont le centre instantané de rotation par rapport au plan (xOy), fixe et perpendiculaire à l'axe du piston (fig. VI-15), est facile à déterminer. En effet le pied de bielle B a un mouvement rectiligne alternatif : sa vitesse est donc portée par l'axe Oy ; la tête de bielle A a un mouvement circulaire (pratiquement uniforme) : sa vitesse est donc perpendiculaire à la manivelle OA. Le seul point de vitesse nulle, ou centre instantané de rotation (V. t. 1, Mécanique des solides) est à l'intersection des perpendiculaires menées respectivement en A et B à la direction des vecteurs vitesse de A et de B. Ce centre décrit dans le plan fixe une courbe appelée base et dans le plan mobile lié à la bielle une courbe appelée roulante. Ces courbes ont des formes complexes, difficiles à caractériser dans le cas général. Le vecteur vitesse en tout point M de la bielle peut être déterminé à tout instant à partir du centre instantané de rotation par la construction inverse.

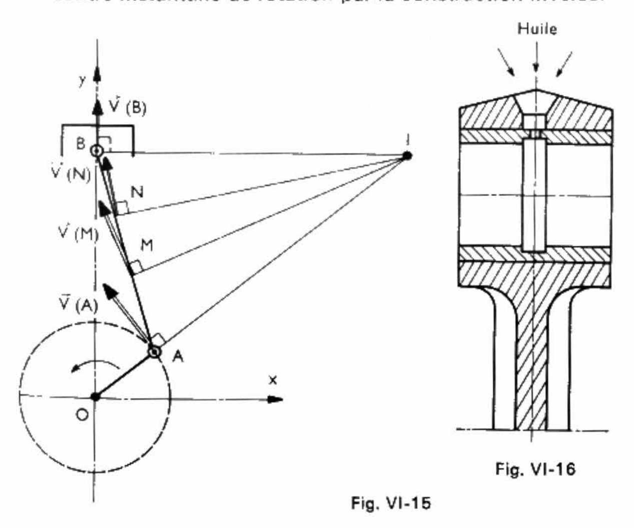


Fig. VI-16

Fig. VI-15

Le mouvement de la bielle est très complexe : quand la manivelle tourne, le point I (C.I.R.) se déplace sur la perpendiculaire en B à Oy et en chaque point de la bielle le vecteur vitesse de ce point change constamment de direction et de valeur. Chaque point de la bielle est donc soumis à des accélérations importantes et les quantités d'accélération correspondantes imposent à la bielle des sollicitations (flexion et traction ou compression) qui se superposent aux sollicitations dues aux forces que lui appliquent le piston et la manivelle (V. § 1.3.4). La bielle apparaît comme un organe très chargé dynamiquement, surtout lorsque la vitesse de rotation de la manivelle est grande (efforts proportionnels à ω^2). C'est le cas des bielles des moteurs alternatifs rapides modernes.

1.5.2. Pied de bielle. — L'assemblage du corps de bielle avec l'axe du piston se fait par le pied de bielle qui transmet à la bielle les efforts appliqués à l'axe du piston. Le montage de l'axe peut être fixe ou tournant par rapport au pied de bielle.

1° *Axe fixe.* — Le serrage de l'axe est obtenu, soit par vis ou par clavette vélo, soit par emmanchement à la presse. Ce dernier procédé a été adopté par la General Motors en 1956 ; le montage doit être fait avec certaines précautions pour éviter de rayer l'axe lors de l'emmanchement. Il faut ajouter qu'un serrage trop faible peut provoquer un phénomène de corrosion de contact par suite de microdéplacements de l'axe dans le pied, cette corrosion entraînant à son tour, lors du démontage, le grippage de l'axe et la détérioration de la bielle et du piston.

2° *Axe tournant.* — Une bague est alors interposée entre le pied de bielle et l'axe. Pour des réalisations en petite série, la bague est décolletée dans un jet coulé de bronze phosphoreux ou obtenue à partir de bronze en tube étiré et calibré à froid. Pour de grandes séries (moteurs d'automobiles), la bague est roulée à partir d'un flan rectangulaire en tôle d'acier doux recouverte d'une épaisseur de 0,5 à 0,6 mm de bronze, ce bronze ayant, par exemple, la composition suivante : cuivre 80 %, étain 10 %, plomb 10 %. Les pattes d'araignées ou les rainures sont frappées par l'outillage de découpe du flan. L'alésage est usiné après mise en place dans le pied de bielle. Le graissage se fait par un évasement qui recueille une partie de l'huile retombant du fond du piston (fig. VI-16). Cette technique s'est beaucoup développée car elle permet d'obtenir des prix de revient moins élevés.

1.5.3. Corps de bielle. — Le corps de bielle est soumis à des sollicitations composées (flexion et traction ou compression). Les sections adoptées sont généralement en I pour les moteurs rapides à allumage commandé ou à allumage par compression (fig. VI-17 et VI-18). Pour les moteurs lents dont le cycle est à deux temps on adopte parfois une section circulaire pleine ou creuse. Les parties les plus délicates à déterminer sont les formes de raccordement à la tête et au pied.

1.5.4. Tête de bielle

1° *Moteur en ligne.* — Elle peut être en une ou deux parties suivant la conception du vilebrequin. Dans le

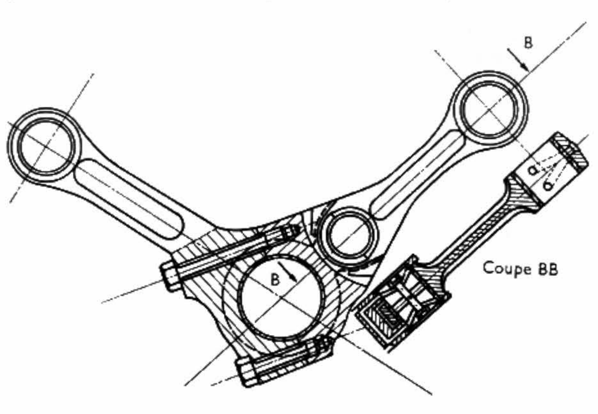


Fig. VI-17

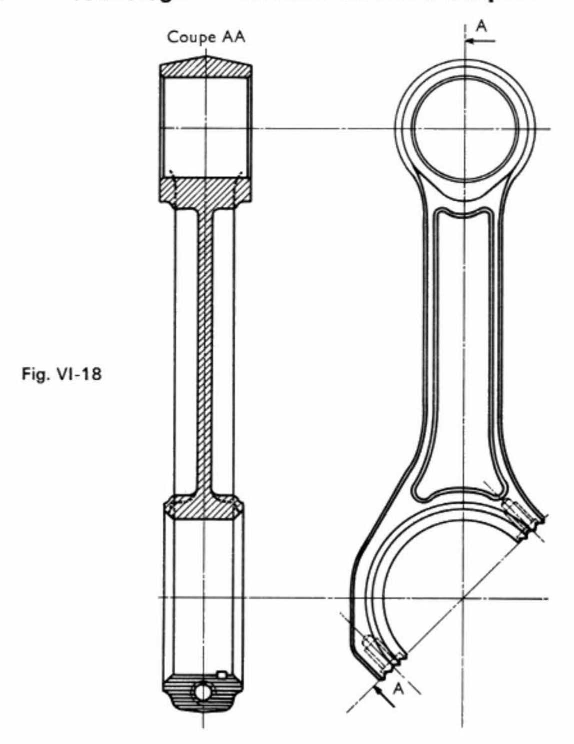


Fig. VI-18

deuxième cas, le chapeau est fixé au corps de bielle par des boulons ou par des vis (fig. VI-17, VI-19 et VI-20) et sa coupe peut être droite ou oblique. Cette dernière solution permet de sortir la bielle par le haut du cylindre lorsque le chapeau est enlevé (fig. VI-18 et VI-20).

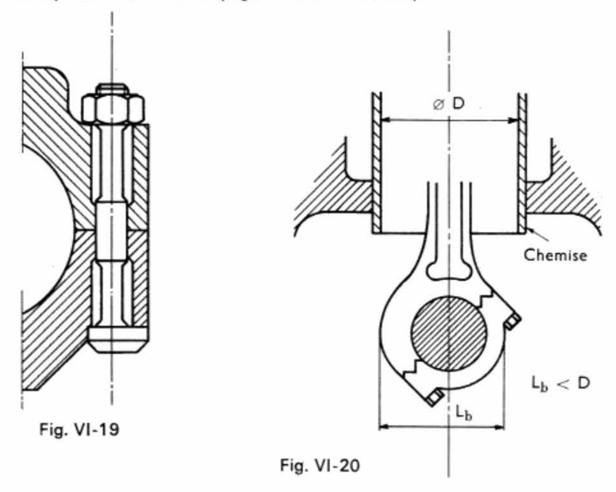


Fig. VI-19

Fig. VI-20

2° *Moteur en V.* — Il y a deux bielles pour un maneton. Le montage peut alors se faire avec deux bielles identiques côte à côte (solution la plus fréquente), avec une bielle simple et une bielle à fourche (fig. VI-21) ou avec une bielle maîtresse sur laquelle vient s'articuler une bielle pour la seconde rangée de cylindres (fig. VI-22 et

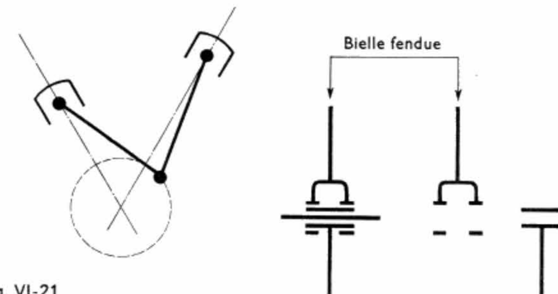


Fig. VI-21

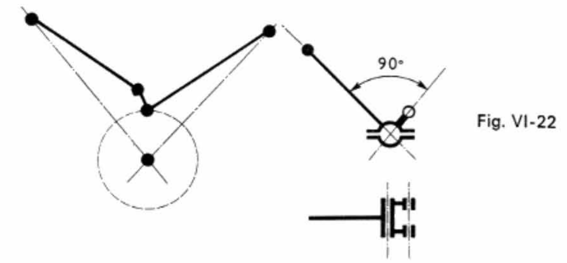


Fig. VI-22

17). Dans ce dernier cas la course du piston est différente suivant la rangée de cylindres à laquelle il appartient.

3° *Moteur en étoile.* — Un tel moteur comporte obligatoirement un nombre impair de cylindres (5, 7 ou 9) et une bielle maîtresse sur laquelle viennent s'articuler 4, 6 ou 8 biellettes (fig. VI-23).

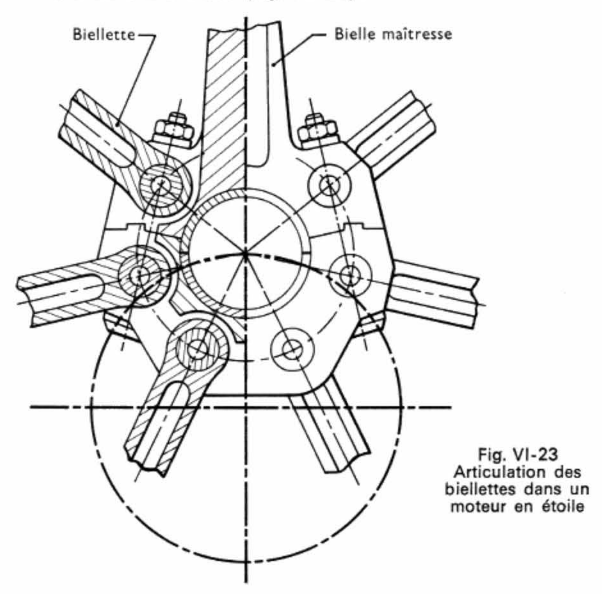


Fig. VI-23
Articulation des biellettes dans un moteur en étoile

1.5.5. Matériaux utilisés. — En général, les bielles sont forgées ou matricées en aciers au nickel chrome. On admet pour ces matériaux des contraintes voisines de 40 daN/mm². Des expériences ont été tentées avec des alliages d'aluminium afin de diminuer les efforts d'inertie; les difficultés technologiques rencontrées, pour l'assemblage de l'axe en particulier, ont fait que cette solution est pratiquement abandonnée. Les recherches d'allégement maximal ont conduit les constructeurs de moteurs de compétition à faire des bielles en titane qui sont matricées et entièrement usinées. Les constructeurs d'Outre-Atlantique utilisent beaucoup la fonte à graphite sphéroïdal qui présente des caractéristiques mécaniques voisines de celles des aciers mi-durs.

1.6. Manivelle. — La manivelle actionnée par la bielle transforme le mouvement alternatif du piston en mouvement circulaire (V. § 1.1).

1.6.1. Manivelle simple. — Elle est fixée à l'extrémité de l'arbre qu'elle commande et, par conséquent, le maneton se trouve en porte à faux. Elle n'est employée que sur des moteurs de cyclomoteur ou des micromoteurs.

1.6.2. Arbre coudé ou vilebrequin. — Un vilebrequin est formé de groupes de deux manivelles dont le maneton est commun. Il a l'avantage de supprimer le porte-à-faux du maneton, par conséquent de diminuer les déformations et d'augmenter les efforts admissibles.

1° *Vilebrequin à coude unique non équilibré.* — Pour de petites dimensions, il est forgé et coudé à partir d'une barre ronde ou carrée et sa forme générale se rapproche de celle d'un trapèze isocèle (fig. VI-24 a). Afin de réduire son encombrement en longueur, ou pour des dimensions importantes, il est usiné directement dans la masse

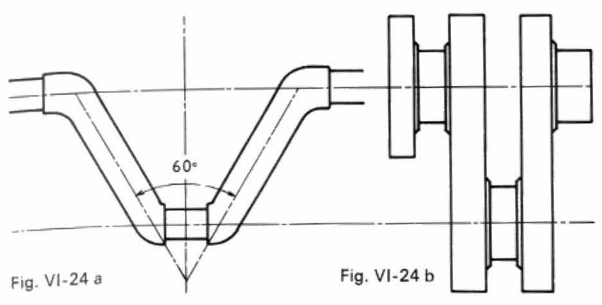
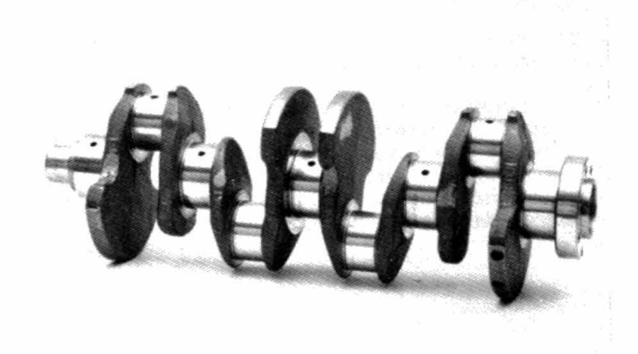
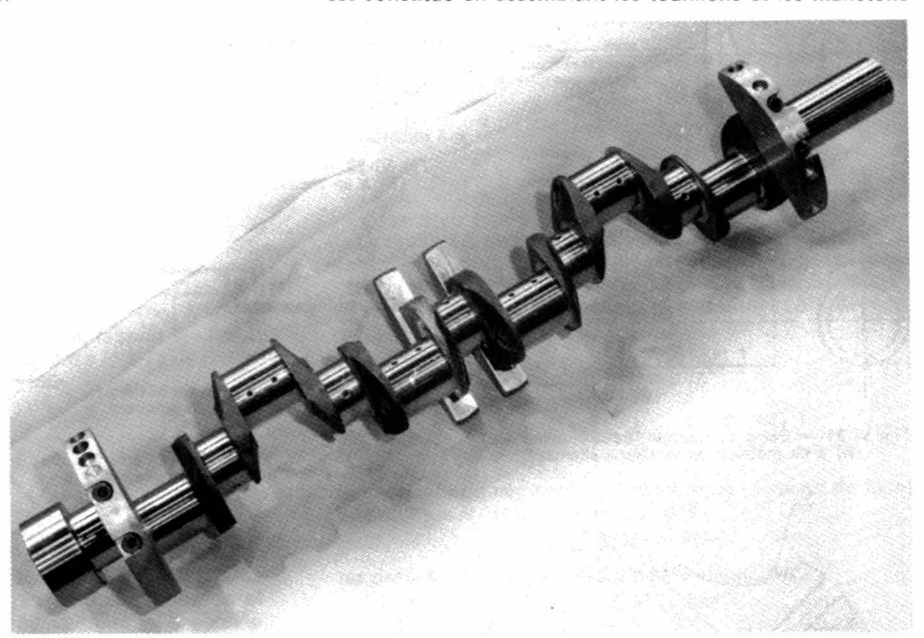


Fig. VI-24 a Fig. VI-24 b

(fig. VI-24 b). Quelle que soit sa conception, il ne convient que pour des vitesses lentes car les forces d'inertie périodiques des pièces mobiles (proportionnelles à ω^2) sont appliquées à ses paliers et engendrent des vibrations.

2° *Vilebrequin à coude unique équilibré.* — Dès que la vitesse est moyenne ou que les masses des pièces mobiles sont importantes, il est indispensable de limiter ces vibrations en équilibrant (au moins partiellement) les forces d'inertie des pièces mobiles par des forces intérieures au système des pièces mobiles. Ce résultat est obtenu en ajoutant au vilebrequin des masses d'équilibrage, appelées contrepoids, dont les forces d'inertie sont opposées à celles du maneton et de la tête de bielle. Ces contrepoids peuvent être rapportés : ils sont alors fixés sur les flasques par vis (fig. VI-25), par queue d'aronde, par bridage ou par soudure. Ils peuvent aussi faire partie intégrante du vilebrequin lorsque celui-ci est une pièce moulée (fig. VI-26).


Fig. VI-26 (*Renault*)


Fig. VI-25 (*Baudoin*)

3° *Vilebrequin à coudes multiples.* — Lorsque plusieurs cylindres agissent sur un même arbre, cas général des moteurs à explosion, on utilise des vilebrequins à coudes multiples. Ces vilebrequins étant des pièces très sollicitées, on les réalise exclusivement en métaux ferreux de caractéristiques mécaniques élevées. Les principaux procédés d'élaboration sont :

— usinage dans la masse : la forme des manivelles oblige à enlever une quantité énorme de métal. Ce procédé, employé pour quelques pièces prototype de petites ou moyennes dimensions, est inconcevable pour des séries, aussi réduites soient-elles ;

— forgeage et matriçage (fig. VI-25) : ce sont les procédés les plus généralement utilisés ; ils ont l'avantage de conserver les fibres du métal, ce qui améliore la résistance du vilebrequin obtenu ;

— moulage : il était réservé aux vilebrequins peu chargés. Les caractéristiques mécaniques élevées des fontes modernes, en particulier celles des fontes à graphite sphéroïdal ont permis son extension aux vilebrequins des moteurs d'automobiles qui sont très chargés. Les contrepoids sont obtenus directement, quelles que soient leur forme et leur position. Le vilebrequin est coulé verticalement, côté volant en haut, dans un moule constitué par des galettes superposées. Pour un vilebrequin plat, le plan de joint du moule passe par l'axe des manetons (fig. VI-26). Ce procédé facilite l'allégement, tourillons et manetons creux pouvant être obtenus directement de fonderie par noyautage ;

— procédé *built-up* ou *semi-built-up* : le vilebrequin est constitué en assemblant les tourillons et les manetons par frettage, par clavetage ou par boulonnage sur les bras. Cette technique s'applique, soit aux très gros vilebrequins, soit aux très petits vilebrequins (automobiles ou motocyclettes). Dans ce dernier cas, elle permet le montage de roulements à rouleaux ou à aiguilles entre maneton et tête de bielle.

— *Remarque :* il faut noter que les vilebrequins pour moteurs à explosion modernes doivent être parfaitement équilibrés statiquement et dynamiquement, étant donné leur vitesse de rotation (4 000 à 7 000 tr/mn pour les moteurs de compétition et même 14 000 tr/mn pour certaines motocyclettes). Aussi tous les vilebrequins à coudes multiples sont-ils équilibrés et pour que leur équilibrage dynamique complet soit possible, il est nécessaire qu'ils soient symétriques par rapport au plan perpendiculaire à l'axe de rotation et équidistant des paliers extrêmes. Par ailleurs, presque tous les vilebrequins modernes ont un palier entre chaque maneton afin de réduire au minimum leur déformation de flexion, ce qui améliore la tenue du vilebrequin et de ses paliers.

2. EXCENTRIQUE ET CAME

L'un ou l'autre ne permettent que la transformation du mouvement circulaire en mouvement alternatif.

2.1. Excentrique. — Il est constitué par un disque circulaire monté excentré sur un arbre ou sur un vilebrequin (fig. VI-27). Une tête de bielle de faible épaisseur, appelée collier, l'entoure et le pied de bielle a un mouvement alternatif (rectiligne ou non). Il ne convient que pour des vitesses et des efforts moyens.

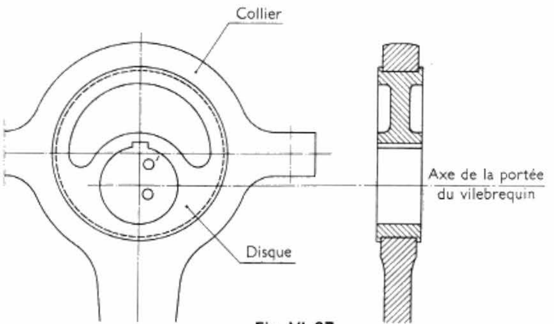


Fig. VI-27

2.2. Came

2.2.1. Définition. — Une came est un solide (A) tournant autour d'un axe fixe et agissant par contact linéaire ou ponctuel sur un autre solide guidé (B) pour le mettre en mouvement. La liaison entre (A) et (B) peut être unilatérale (fig. 30, 31, 32 et 34) ou bilatérale (fig. VI-28, 29 et 33). Le mouvement de (B) est le plus souvent un mouvement rectiligne mais il peut être aussi un mouvement de rotation alternatif (fig. VI-32) ou un mouvement de rotation discontinu (fig. VI-33).

Suivant leur fonction les cames agissent soit par leur contour extérieur : ce sont les cames à disque (fig. VI-29, 30, 31 et 32) ; soit par une rainure taillée dans leur masse : ce sont les cames à rainure (fig. VI-28) ; soit par une surface gauche, ce sont les cames cylindriques (fig. VI-34). Les multiples combinaisons possibles du mouvement circulaire avec des mouvements alternatifs circulaires ou rectilignes font que les cames sont très utilisées pour divers mécanismes de commande et de transformation de mouvement. En particulier, elles sont universellement utilisées pour la commande des soupapes de moteurs à combustion interne et dans les pompes à injection des moteurs Diesel ; elles servent aussi dans les machines-outils, les machines à coudre et les métiers à tisser.



Fig. VI-28 — Came à plateau ; liaison unilatérale ; (B) a un mouvement rectiligne alternatif

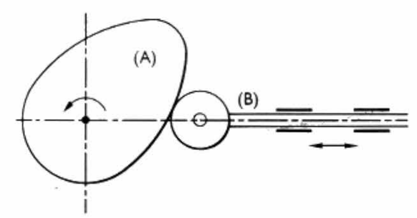


Fig. VI-29 — Came à galet ; liaison unilatérale ; (B) a un mouvement rectiligne alternatif

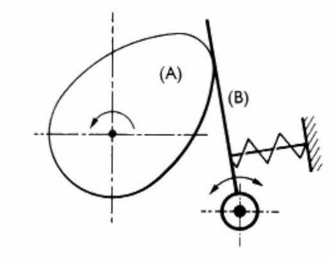


Fig. VI-30 — Liaison unilatérale ; (B) a un mouvement de rotation alternatif

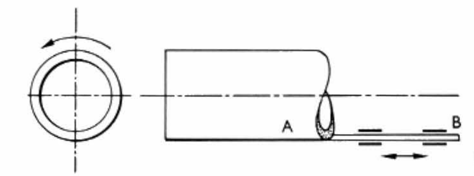
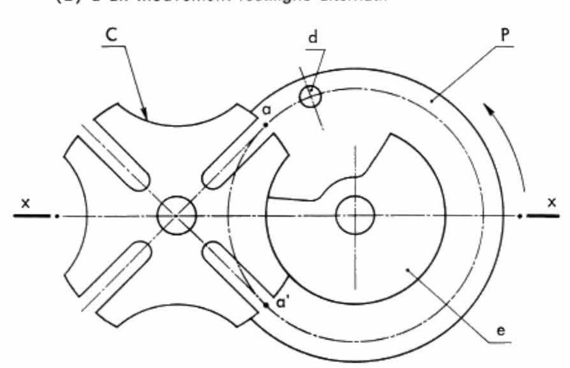


Fig. VI-31 — Came cylindrique ; liaison unilatérale ; (B) a un mouvement rectiligne alternatif

Fig. VI-32 — Came à rainure ; liaison bilatérale ; (B) a un mouvement rectiligne alternatif

Fig. VI-33 — Came à cadre ; liaison bilatérale ; (B) a un mouvement rectiligne alternatif



Coupe x

Fig. VI-34

2.2.2. Étude cinématique. — La loi du mouvement du solide (B) étant imposée, le problème consiste à chercher le contour théorique (C_1) de la came (A), celle-ci étant animée d'un mouvement circulaire uniforme. Dans cette étude, on suppose que les organes en présence sont indéformables. Soit (Oxy) un système d'axes de référence et OX un axe lié à la came (fig. VI-35). Le mouvement de la came est défini par l'angle $\theta = (Ox, OX) = \omega . t$. L'origine des temps est prise à l'instant où les axes Ox et OX sont confondus et ω est la vitesse de rotation de la came. Le point M, extrémité théorique du solide (B) au contact avec la came, se déplace sur l'axe Ox entre deux positions M_0 et M_1 (à condition que le solide (B) soit sollicité par un système de rappel le maintenant en contact avec la came,

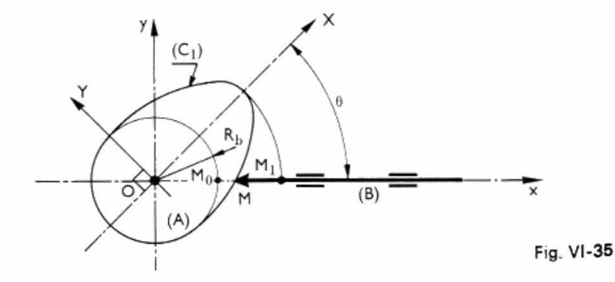


Fig. VI-35

par exemple, des ressorts hélicoïdaux). À un instant donné l'abscisse x du point M sur Ox est :

$$x = OM_0 + M_0M$$

OM_0 est une constante ayant pour valeur le rayon de base R_b de la came et $M_0M = f(\omega t)$ est fonction de l'angle θ, d'où :

$$x = R_b + f(\omega t)$$

La fonction périodique $f(\omega t)$ de période $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$ est imposée : c'est la loi des espaces du mouvement du solide (B) dont la vitesse et l'accélération sont :

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{df(\omega t)}{dt}$$

$$\gamma = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2f(\omega t)}{dt^2}$$

L'équation du contour théorique (C_1) de la came en coordonnées polaires est : $P = R_b = f(\theta)$, θ variant de 0 à 2π. On choisit R_b pour que le fonctionnement cinématique correct soit possible.

2.2.3. Tracé d'une came à plateau. — Le point de contact H est variable sur la droite (Δ) attachée au solide (B). Le mouvement du point M étant connu on peut tracer le contour théorique (C_1) de la came sans plateau (fig. VI-36). Le contour (C) de la came à plateau est obtenu

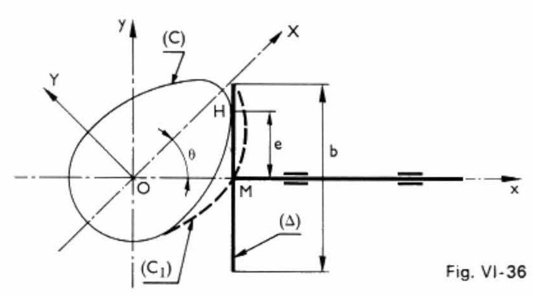
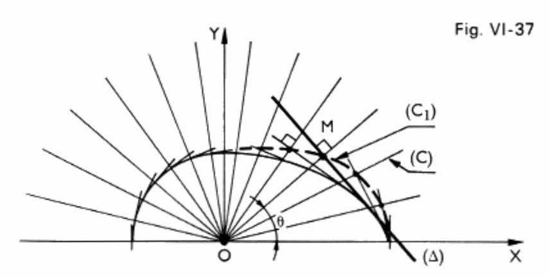


Fig. VI-36

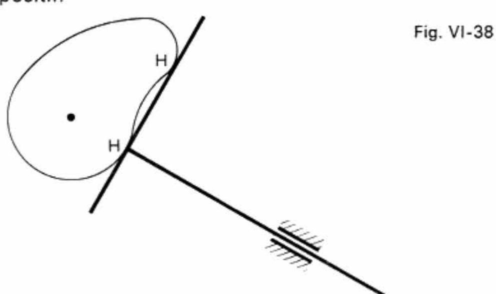
comme enveloppe de ses propres tangentes en fixant la came et en faisant tourner le solide (B) autour de O tout en imposant à M de décrire la courbe (C_1) (fig. VI-37) : (C) est alors l'antipodaire de (C_1) par rapport à O si Δ est perpendiculaire à Ox. La distance de H à l'axe Ox est

Fig. VI-37



appelée excentricité e de la came pour l'angle θ considéré et la longueur b (fig. VI-36) du plateau doit être au moins égale à deux fois l'excentricité maximale. Si le contour (C) de la came admet des points singuliers ou des parties concaves (fig. VI-38) son fonctionnement cinématique correct est alors impossible. Ces défauts n'apparaitront pas si le rayon de courbure R_c en chaque point de la came est toujours positif.

Fig. VI-38



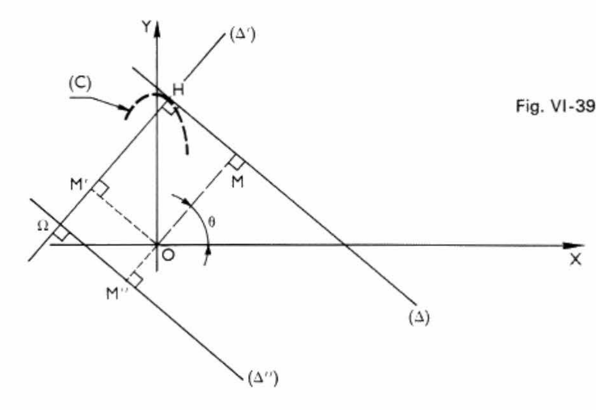


Fig. VI-39

Dans le plan (XOY) lié à la came (fig. VI-39), l'équation eulérienne de la droite (Δ) est :

$$X\cos\theta + Y\sin\theta = R_b + f(\omega t) \quad (1)$$

$$X\sin\theta + Y\cos\theta = \frac{df(\omega t)}{d\theta} \quad (1')$$

Les coordonnées X et Y du point de contact H (point caractéristique) vérifient le système d'équations (1) et (1'), l'équation (1'), obtenue en dérivant l'équation (1) par rapport au paramètre θ, étant représentée par une droite (Δ') perpendiculaire en H à la droite (Δ). L'excentricité e, représentée par le segment MH égal au segment OM', vaut donc :

$$e = \frac{df(\omega t)}{d\theta} = \frac{df(\omega t)}{dt}\cdot\frac{d\theta}{dt}$$

et comme $t = \dfrac{\theta}{\omega}$:

$$e = \frac{df(\omega t)}{dt}\cdot\frac{1}{\omega}$$

La droite (Δ') est la normale en H au profil de la came. Le centre de courbure en H de la courbe (C), est donc confondu avec le point caractéristique Ω de la droite (Δ'), point qui est à l'intersection des droites (Δ') et (Δ'') d'équations :

$$-X\sin\theta + Y\cos\theta = \frac{df(\omega t)}{dt}\frac{1}{\omega} \quad (1')$$

$$-X\cos\theta - Y\sin\theta = \frac{d}{d\theta}\left(\frac{df(\omega t)}{dt}\frac{1}{\omega}\right) \quad (1'')$$

La longueur du segment ΩH représente la valeur du rayon de courbure R_c de la courbe (C) en H :

$$R_c = \Omega M' + M'H$$

les droites (Δ') et (Δ'') étant perpendiculaires :

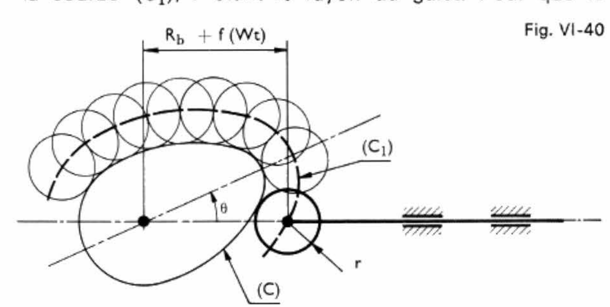
$$R_c = OM + OM''$$

soit, compte tenu des équations (1) et (1'') :

$$R_c = R_b + f(\omega t) + \frac{1}{\omega^2}\cdot\frac{d^2f(\omega t)}{dt^2}$$

2.2.4. Tracé d'une came à galet. — Soit (C_1) le contour théorique de la came (fig. VI-40) lorsque le solide (B) n'a pas de galet : le profil (C) de la came à galet est l'enveloppe des cercles de rayon r dont les centres décrivent la courbe (C_1), r étant le rayon du galet. Pour que le

Fig. VI-40



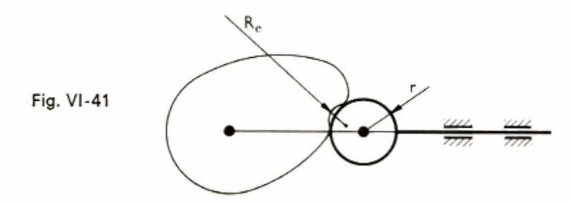


Fig. VI-41

fonctionnement cinématique correct de la came soit possible, le rayon de courbure R_c en tout point de la came doit être, en valeur absolue, supérieur à r (fig. VI-41). Le rayon de courbure R_c en chaque point d'une came à galet se détermine par des calculs analogues aux précédents. On obtient :

$$R_c = \frac{\left[A^2 + \frac{1}{\omega^2}\left(\frac{df}{dt}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{A^2 + \frac{2}{\omega^2}\left(\frac{df}{dt}\right)^2 - \frac{A}{\omega^2}\frac{d^2f}{dt^2}}$$

avec : $A = R_b + r + f(\omega t)$.

2.2.5. Pression de contact. — Le contour de la came et les masses mises en mouvement étant connus, il est utile de vérifier que la pression de contact came-organe commandé reste admissible pour les matériaux prévus. Si cette pression est très élevée, la came et le poussoir subissent un traitement de surface (cémentation et trempe, nitruration) afin d'augmenter leur dureté superficielle. L'action F exercée par le poussoir sur la came est déterminée par une étude dynamique du système et la pression de contact se calcule par les formules de Hertz (V. t. 3; Résistance des matériaux, chap. 11). Pour les cames à plateau, si celui-ci est circulaire (cas le plus fréquent), la longueur de la ligne de contact en fonction de e est $l = \sqrt{b^2 - 4e^2}$, avec b diamètre du plateau (fig. VI-42).

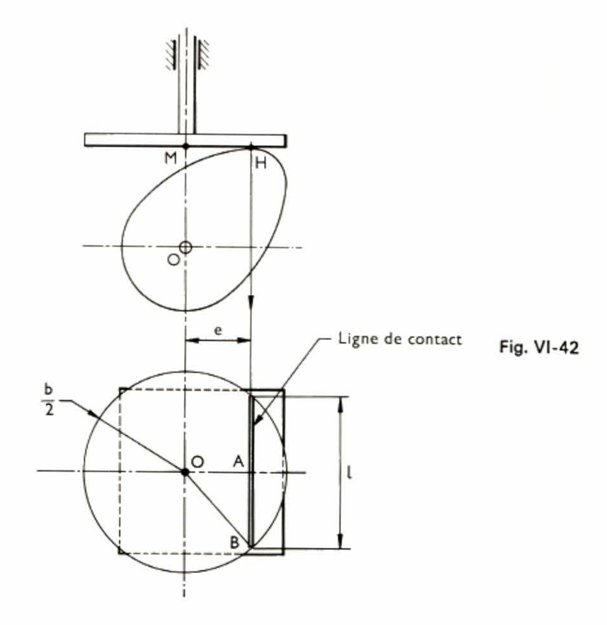


Fig. VI-42

CHAPITRE VII
BÂTIS ET CARTERS

1. GÉNÉRALITÉS

La fonction mécanique assurée par les bâtis et carters consiste à supporter et guider les organes d'une machine ou d'un appareil. Si l'on prend pour exemple une perceuse à colonne, le rôle du bâti consiste principalement à supporter et à guider le plateau porte-pièce, à permettre la fixation du moteur et de la boîte de vitesses et à assurer le guidage des mouvements de rotation et de translation de la broche. Selon le procédé de fabrication, on distingue principalement les bâtis obtenus par moulage et les bâtis obtenus à partir d'éléments soudés.

Dans chacune de ces deux catégories on rencontre deux types de conception, selon le mode de travail du matériau au point de vue résistance mécanique. Ce sont :

— *les bâtis-poutres* constitués essentiellement par des sections à nervures en I, en T ou en U (fig. VII-1 et 2) et

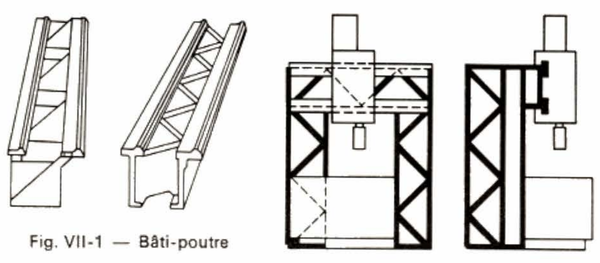

Fig. VII-1 — Bâti-poutre

Fig. VII-2 — Bâti à caissons-poutre

pouvant être obtenus facilement par soudage ou par moulage. Ils offrent une grande résistance pour un poids relativement léger et sont particulièrement recommandés pour les pièces travaillant à la flexion et, d'une manière générale, pour des sollicitations simples ;

— *les bâtis-coques* formés de sections creuses rectangulaires, circulaires ou diverses (fig. VII-3 et 4). Ils sont souvent obtenus par moulage en raison de leurs formes intérieures et ils sont généralement employés dans le cas de sollicitations composées comme celles qui agissent dans la plupart des machines-outils (tours, fraiseuses, aléseuses).

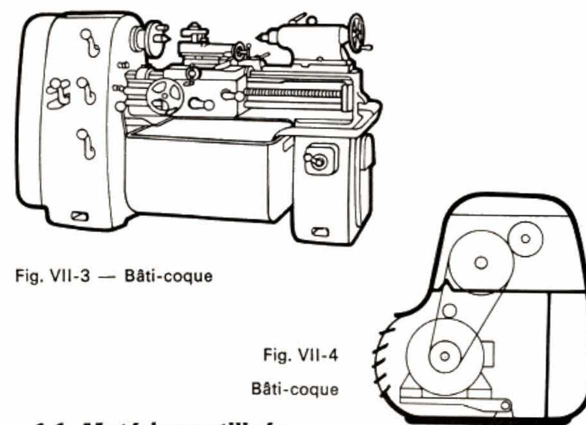

Fig. VII-3 — Bâti-coque

Fig. VII-4
Bâti-coque

1.1. Matériaux utilisés

1.1.1. Fonte. — C'est un matériau économique très moulable qui permet donc la réalisation de formes complexes. Il s'usine bien, résiste à la corrosion et à l'oxydation. Comme il possède de bonnes qualités frottantes, il sera tout indiqué pour la réalisation des glissières de machines. Sa capacité d'absorption des vibrations est importante et sa perméabilité magnétique très inférieure à celle de l'acier. Il résiste très bien à la compression mais résiste mal à l'extension et, pour cette dernière sollicitation, il faudra

utiliser un coefficient de sécurité important. Sa résistance à la flexion est également médiocre. Il est particulièrement indiqué pour la construction des bâtis de machines-outils et de carters de moteurs, de pompes ou de compresseurs.

1.1.2. Acier moulé. — Ce matériau, plus coûteux que la fonte, est, de plus, moins moulable, mais, comme sa résistance mécanique est supérieure, il permettra la réalisation de bâtis plus légers. La perméabilité magnétique de l'acier est meilleure que celle de la fonte. L'acier moulé sera utilisé notamment pour la réalisation de bâtis, de turbines, de pompes haute-pression et de carcasses de moteurs électriques.

1.1.3. Acier laminé. — Ce matériau est utilisé pour la réalisation des bâtis soudés. La première phase consiste à découper des éléments laminés qui peuvent être des tôles, des profilés ou des tubes. Certains éléments sont préalablement emboutis avant soudage. Le mode d'élaboration de ces produits métallurgiques leur confère une structure plus saine et plus homogène que celle de l'acier moulé ou de la fonte. La résistance mécanique est également accrue. On obtient donc des constructions plus économiques et plus légères dont le domaine d'application s'étend de plus en plus. On peut citer les bâtis d'appareils de levage et de presses à découper ou à emboutir, les carcasses d'alternateurs.

1.1.4. Alliages légers. — Les alliages de fonderie les plus utilisés sont essentiellement les alliages d'aluminium. Une de leurs propriétés, outre la légèreté, est leur facilité de moulage en sable ou en coquille métallique. Leur résistance mécanique est plus faible que celle des aciers et leur prix de revient plus élevé. Leur emploi est très répandu dans l'automobile et l'aviation en raison de la réduction des masses qu'ils permettent de réaliser.

1.2. Procédés de fabrication

1.2.1. Construction soudée. — Elle permet de réaliser des ensembles complexes, volumineux et non démontables à partir d'éléments simples tels que tôles, plats, profilés et laminés divers, éventuellement préparés par cintrage, pliage ou emboutissage. Les éléments sont obtenus dans un premier temps par sciage, par cisaillage ou par oxycoupage. Par rapport au moulage, la construction soudée est plus simple puisqu'elle ne nécessite pas de modèle. Elle est souvent plus résistante car elle ne présente pas les défauts que l'on rencontre dans les pièces moulées. Le métal reste plus homogène. La construction soudée est également plus légère et plus rapide. Elle est particulièrement avantageuse pour les pièces exécutées en un seul exemplaire ou en quelques exemplaires. Dans le cas de petites séries, il est possible d'utiliser des montages de soudure qui conservent à ce procédé son intérêt. Toutefois, il faut noter que la contraction du cordon de soudure et le retrait de l'ensemble de la pièce lors du refroidissement (à une vitesse qui n'est pas la même pour les différentes parties) peuvent provoquer des déformations. Si le retrait est gêné dans certaines zones, il subsiste des contraintes résiduelles parfois élevées et dangereuses. Il est donc nécessaire, lors de la conception du bâti, de tenir compte de ces faiblesses et de choisir les formes définitives évitant ou réduisant ces phénomènes. Il est possible de les atténuer, voire de les supprimer, par un traitement thermique approprié dit *recuit de stabilisation*.

1.2.2. Construction moulée. — Le métal est chauffé jusqu'à la fusion, coulé dans les moules puis refroidi. Ce procédé permet de réaliser à un prix de revient relativement peu élevé des pièces de formes quelconques (intérieurement ou extérieurement). Pour ces pièces, et dans le cas de fabrication en série, la confection des moules est parfois longue et onéreuse. Il convient de remarquer, en outre, que le procédé de fonderie n'est applicable qu'à certains alliages métalliques (fontes, aciers moulables, alliages légers) et si les formes ne sont pas étudiées rationnellement, on risque d'obtenir des pièces présentant des défauts inhérents à ce procédé, c'est-à-dire dartres, soufflures, piqûres et retassures. Les parois minces sont, par ailleurs, difficiles à obtenir et de moins bonne précision.

1.3. Fonctions d'un bâti. — Le rôle d'un bâti est important car il remplit de multiples fonctions. Le bâti d'une machine ou le carter d'un mécanisme doit, comme première condition, assurer aux différentes pièces de la machine une position bien déterminée ou guider un mouvement de rotation ou de translation. Les positionnements et les guidages à réaliser par le bâti devront être aussi précis que la machine le requiert, cela malgré les dilatations, l'usure ou les déformations inévitables. Corrélativement, les contraintes en service doivent rester inférieures aux contraintes admissibles du matériau et les déformations du bâti, sous l'effet des efforts qui lui sont transmis par les organes, doivent rester très faibles. Il devra donc être à la fois résistant et suffisamment rigide.

Le bâti doit transmettre au sol ou à un massif de fondation les efforts supportés par le mécanisme; en conséquence, les surfaces d'appui de la semelle devront être adaptées à la fois aux charges et à la résistance du sol. Dans d'autres cas, la machine sera isolée par des supports élastiques de façon à ne pas transmettre de vibrations aux installations voisines. Celles-ci sont généralement dues aux défauts d'équilibrage ou aux guidages. La masse et la rigidité du bâti jouent un rôle important dans l'absorption des vibrations. Il est d'ailleurs souhaitable, du point de vue de la stabilité, que l'assise de la machine soit large et le centre de gravité situé le plus bas possible.

Le bâti doit permettre le montage et le démontage des organes qu'il contient, ainsi que leur réglage et le graissage des mécanismes : il doit donc comporter des portes de visite, des ouvertures ou des parties démontables. En outre, il doit assurer un certain nombre de fonctions moins importantes mais non négligeables, à savoir : permettre la manutention et le transport, former réservoir d'huile (donc être étanche), évacuer la chaleur produite par les frottements et, pour les machines-outils, permettre et faciliter l'évacuation des copeaux. De plus, il doit assurer la protection du personnel chargé d'utiliser la machine, celle-ci devant être elle-même protégée contre la poussière (les particules abrasives accélérant l'usure des surfaces de guidage) et, le cas échéant, contre les projections d'eau.

Enfin, la forme du bâti participe directement à l'aspect général d'une machine qui doit observer les règles de l'esthétique industrielle. Formes et proportions agréables constituent, avec le prix de revient, des critères essentiels de choix pour le constructeur et l'utilisateur. Du point de vue du prix de revient, le choix du matériau et celui du procédé de fabrication sont les plus importants.

2. BÂTIS MOULÉS (1)

Le moulage autorise une grande liberté de forme et les bâtis moulés sont fonctionnels, adaptés à l'usage et d'aspect moderne (esthétique). Les matériaux moulés ont une bonne usinabilité qui, associée à d'autres propriétés, permet de satisfaire à de nombreux desiderata. Le travail demandé à une machine-outil et la fabrication du bâti exige du matériau des qualités variées.

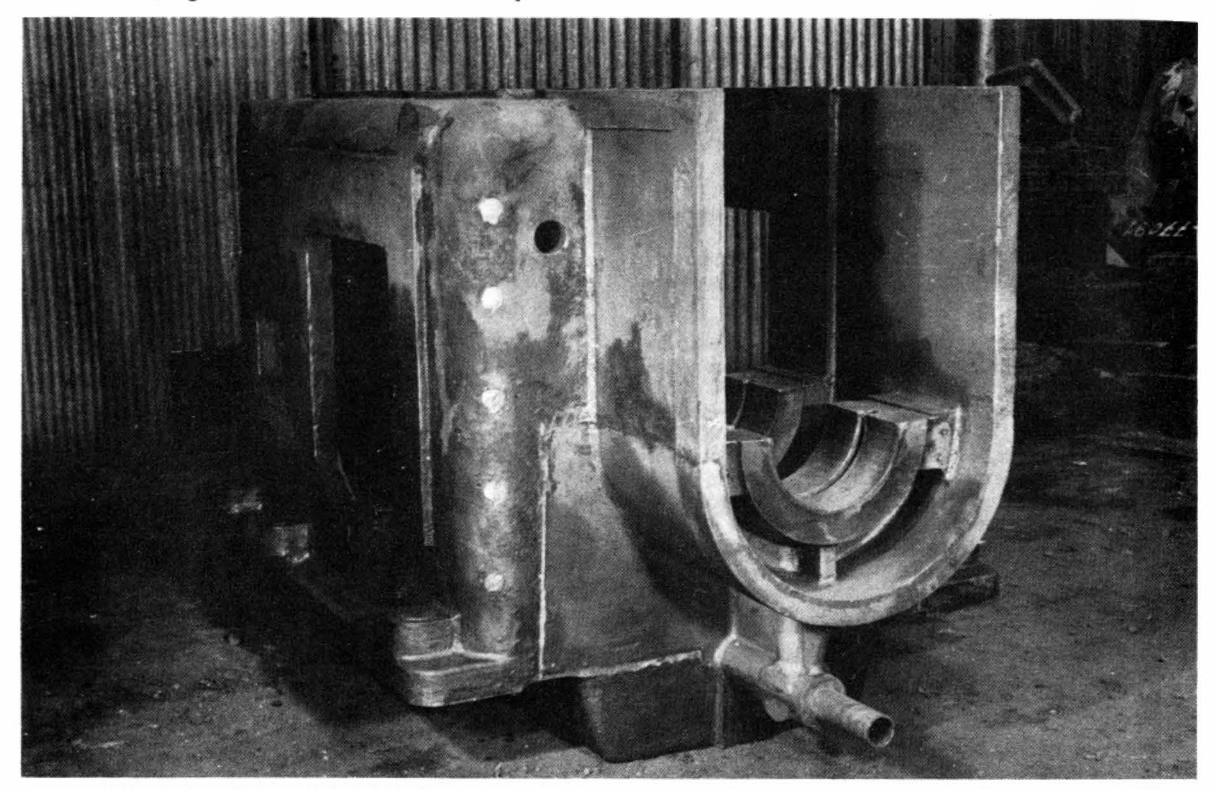
2.1. Qualités du matériau

2.1.1. Prix de revient. — Le coût du métal du bâti représente un pourcentage élevé du prix de revient total d'une machine-outil : pour un tour de taille moyenne, on peut l'estimer à 20 %. Il est donc important d'utiliser un métal peu coûteux. Les nombreuses variétés de fontes existantes permettent de choisir la qualité la mieux appropriée à l'emploi.

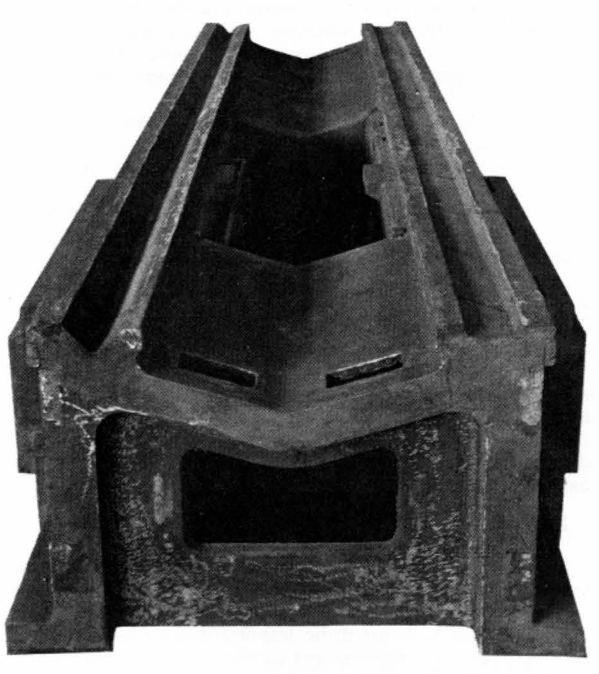
2.1.2. Usinabilité. — L'usinage du bâti, pour être précis, doit s'exécuter sur des machines dont le prix horaire d'emploi est élevé. Il est donc indispensable d'avoir un matériau facile à travailler pour réduire les frais d'usinage.

2.1.3. Module d'élasticité longitudinale. — Les bâtis doivent présenter des déformations en service aussi petites que possible. Les contraintes en service doivent donc être assez faibles pour respecter cette condition. Néanmoins, ces déformations seront d'autant plus faibles que le module

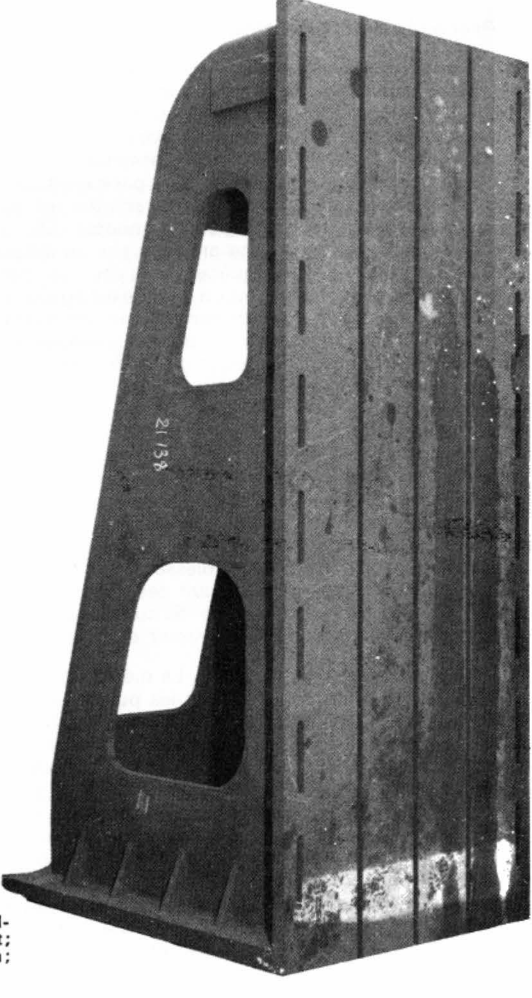
(1) Extraits de la documentation du C.I.F.O.M. et des études de MM. Salje, Mobius et Guilloton.



Bâti de compresseur en fonte grise à graphite lamellaire avec tube en acier noyé à la coulée; masse: 2,6 t (*Fonderies Jean Gresset*)



Bâti de raboteuse en fonte de 5,5 t à deux glissières; fonte perlitique à graphite lamellaire à hautes caractéristiques mécaniques; glissières coulées contre des refroidisseurs pour leur conférer une dureté Brinell de 220 à 240 (*Fonderie de Marly*)



Équerre en fonte grise à graphite lamellaire, pour aléseuse; masse: 5,8 t; longueur: 1,60 m; largeur: 1,20 m; hauteur: 3,20 m (*Bracq-Laurent*)

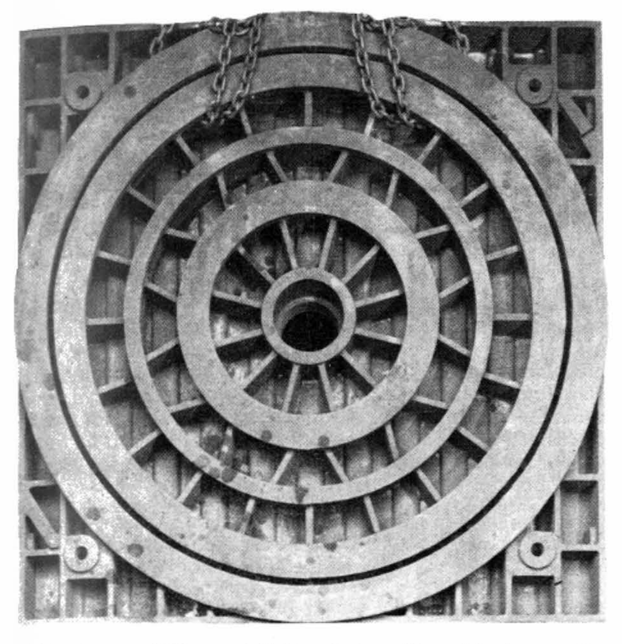
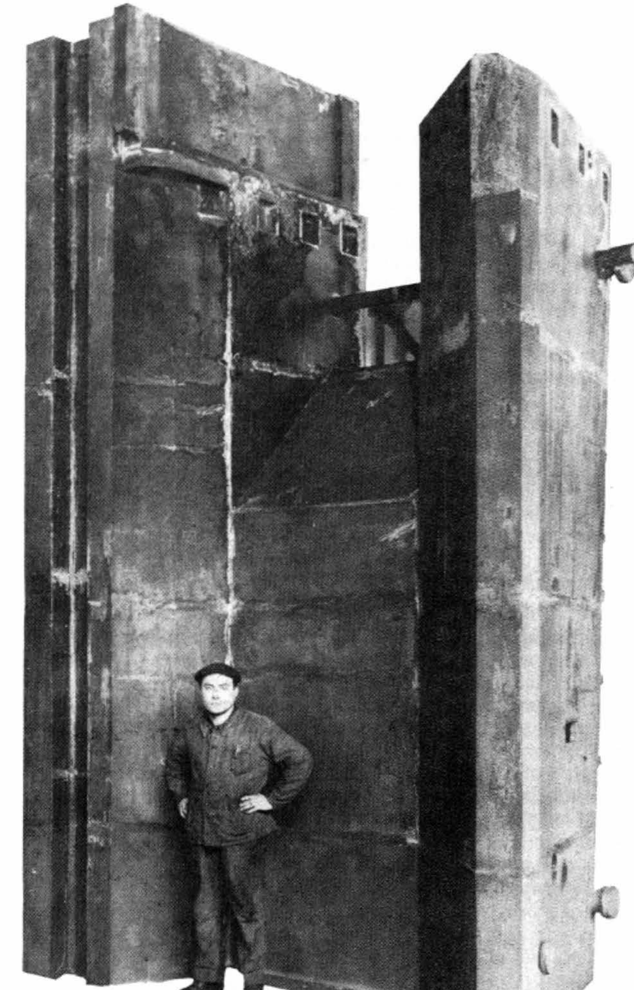
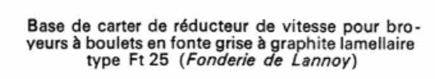


Table pivotante d'aléseuse de 6,5 t en fonte perlitique à hautes caractéristiques mécaniques (R = 35 daN/mm^2) ; mesures : 2,400 m × 2,400 m × 0,300 m (*Jeumont*)



Montant pour tour vertical de 2 m de plateau en fonte à graphite lamellaire à haute résistance (R = 35 daN/mm^2) ; masse : 16 t (*Alcatel*)



Base de carter de réducteur de vitesse pour broyeurs à boulets en fonte grise à graphite lamellaire type Ft 25 (*Fonderie de Lannoy*)

d'élasticité sera plus grand. Par ailleurs, il est nécessaire de tenir constante, à l'intérieur du même bâti et d'un bâti à l'autre, la valeur de ce module sinon les bâtis se déformeront différemment. Or, le module d'élasticité de la fonte est également fonction de la vitesse de son refroidissement lors de la solidification, cette vitesse dépendant elle-même de l'épaisseur des parois. Donc, pour qu'une pièce moulée soit homogène à cet égard, les parois devront avoir une épaisseur aussi constante que possible.

2.1.4. Coefficient de dilatation. — Des différences de températures apparaissent dans un bâti de machine dès que celle-ci est en fonctionnement. Elles sont dues aux moteurs d'entraînement, à la circulation des liquides de refroidissement et de lubrification, aux frottements dans des zones telles que les paliers et, éventuellement, à l'usinage. Elles entraînent des dilatations locales et des déformations. Enfin, la température relative des différents points peut varier dans le temps. Il est donc particulièrement avantageux d'utiliser un matériau à faible coefficient de dilatation, ce qui limite ces déformations. Par ailleurs, le choix du matériau étant fixé, il appartient au constructeur de réaliser le mode de refroidissement le plus efficace. Il faut, par exemple, assurer l'évacuation rapide des copeaux, réaliser l'isolation thermique des dispositifs hydrauliques et faire une étude du dimensionnement de certaines pièces pour dissiper la chaleur par conductibilité.

2.1.5. Dureté. — Les glissières et les paliers des machines destinées à un travail continu doivent résister à l'usure pour conserver leur précision. Dans beaucoup de cas, les glissières viennent de fonderie avec le bâti et il faut utiliser un matériau de base aussi résistant à l'usure que possible, donc suffisamment dur. On augmente souvent cette dureté par des traitements thermiques localisés, comme la trempe superficielle, qui allongent notablement le temps pendant lequel les glissières conservent une précision suffisante.

Les machines devant faire un travail de précision nécessitent des bâtis exempts de tensions internes afin d'éviter des déformations ultérieures. Ces tensions internes disparaissent progressivement avec le temps mais il est préférable de les supprimer initialement par un revenu. Un vieillissement accéléré de la fonte est souvent provoqué artificiellement par un traitement de stabilisation.

2.2. Déformations des bâtis

2.2.1. Sollicitations en cause. — Dans les machines-outils, les efforts de coupe, le poids des pièces et les irrégularités des fonctions des machines scellées de façon permanente, soumettent les bâtis à des sollicitations qui les déforment. Lorsque la précision doit être rigoureuse, le point important est le risque de variations de la déformation en fonction du temps et des conditions de fonctionnement. Ainsi, dans certains cas, les efforts varient progressivement avec le temps en grandeur et en direction (déplacement d'un chariot ou variation d'un effort de coupe) ; dans d'autres cas, les efforts sont alternés et soumettent le bâti à des sollicitations dynamiques.

2.2.2. Direction des déformations. — Pour les machines-outils, si l'on considère la fidélité dimensionnelle de la pièce usinée, celle-ci ne dépend pas seulement de la valeur absolue de la déformation du bâti mais aussi de sa direction. Ainsi, soit X le déplacement de l'outil provoqué lors du tournage par la déformation horizontale du bâti (fig. VII-5). Le centre de la pièce est supposé conserver sa

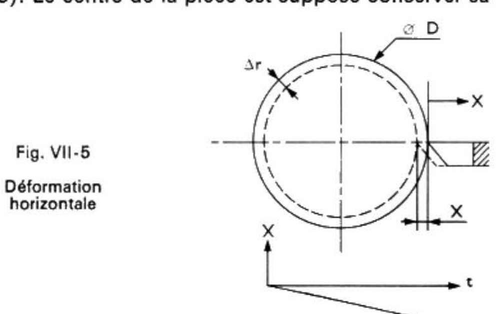


Fig. VII-5

Déformation horizontale

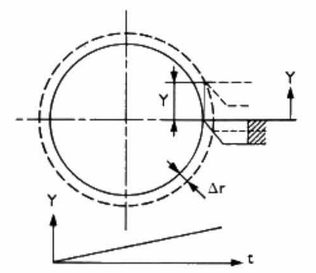


Fig. VII-6

Déformation verticale

position. Sous l'effet de la déformation X le diamètre augmente de $2\ \Delta r = 2\ X$. Si, au contraire, la déformation est verticale (fig. VII-6) et de même valeur absolue que précédemment ($Y = X$), la variation correspondante du diamètre est plus faible : $2\Delta r \ll Y$. Les mêmes observations sont applicables pour les déformations du bâti par vibrations où les déplacements de la pièce usinée par rapport à l'outil varient périodiquement dans le temps : bien que les vibrations horizontales et verticales aient toutes les deux la même amplitude, les ondulations provoquées sur la pièce usinée sont beaucoup plus importantes pour la vibration horizontale (fig. VII-7).

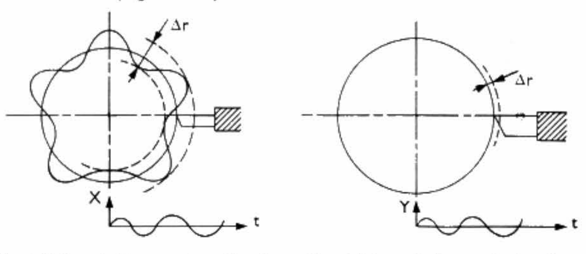


Fig. VII-7 — Influence des vibrations d'un bâti sur la forme de la pièce obtenue

2.2.3. Évaluation des déformations. — Connaissant les forces agissant sur le bâti d'une machine, il n'est pas toujours possible de calculer à l'avance la déformation correspondante. En effet, dans un bâti moulé les formes sont généralement complexes et comportent des sections variées et des évidements. Les moments d'inertie des sections varient donc tout le long du bâti et le calcul s'avère très compliqué. L'étude de telles déformations est réalisée expérimentalement en tenant compte des lois de similitude. Souvent, un élément unique se révèle jouer le rôle principal dans le comportement d'une machine. (V. ci-dessus).

2.2.4. Recommandations générales. — En conclusion, les déformations admissibles dépendent du type de machine-outil, des tolérances d'usinage envisagées et de l'orientation de la déformation par rapport à la surface de la pièce. En général, on cherche à obtenir la rigidité maximale pour le minimum de matière compatible avec la résistance. La quantité de matière utilisée doit être réduite car elle représente une fraction importante du prix global de la machine. Contrairement à l'opinion couramment admise, une machine-outil lourde, à masses amortissantes, ne présente pas toujours la rigidité à la fois dynamique et statique optimale. En fait, la matière première ne peut réaliser un amortissement que là où elle est sollicitée. Pour les parties plates et les montants sollicités à la torsion, on ne devrait (par principe) employer que des nervures en diagonale. Cette observation a son importance pour les carters et les bancs de tours qui travaillent à la torsion. Les semelles méritent une attention particulière. Il est essentiel qu'elles ne soient pas soumises à des efforts de flexion qui correspondent généralement à une utilisation médiocre du matériau. Ainsi, on dispose si possible les boulons de fixation dans le prolongement même des parois portantes car ces parois présentent un faible poids pour un moment d'inertie élevé et, par conséquent, des rigidités statiques et dynamiques importantes.

2.3. Structures des bâtis. — À la suite d'une longue évolution, la conception des bâtis de machines part maintenant de formes fonctionnelles et tend vers une certaine esthétique industrielle.

Fig. VII-8
Bâti à nervures

2.3.1. Structure à nervures (fig. VII-8). — C'est la plus économique du point de vue fonderie car elle ne nécessite pas de noyautage ; toutefois, elle ne donne pas toujours une rigidité élevée et les formes obtenues ne sont guère harmonieuses. Elle n'est pratiquement plus utilisée dans les constructions modernes, sauf pour des machines économiques (genre perceuses ou tours pour artisans où le prix de revient l'emporte sur l'aspect).

2.3.2. Structure en poutre. — L'exemple type de cette structure est illustré par un banc de tour qui constitue une poutre à deux membrures disposée sur deux montants (V. fig. VII-1). La forme en cadre fermé qui en dérive a pour caractéristique une très grande rigidité pour tous les efforts de coupe : ainsi, pour un tour de production la plaque d'assise, le caisson et les montants sont des poutres qui forment ce cadre (fig. VII-9) ; ce mode de construction s'emploie pour des machines-outils spéciales où l'on recherche la rigidité indispensable à leur travail de précision.

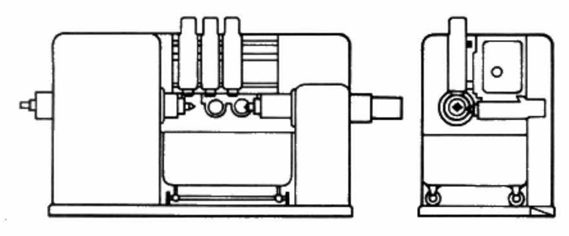
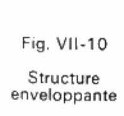


Fig. VII-9 — Bâti-poutre en cadre fermé

On a tenté d'améliorer la construction classique en poutres par l'emploi simultané des poutres et des caissons (V. fig. VII-2). Malheureusement, la guerre et des brevets ont retardé le développement de telles structures. Les machines construites à partir de poutres ne présentent pas toujours l'aspect uni et esthétique que l'on recherche fréquemment.

2.3.3. Structure fermée. — Elle permet d'obtenir la meilleure résistance à poids égal. Son esthétique est acceptable mais, dans le cas des pièces moulées, nécessite souvent une importante préparation avant peinture.

2.3.4. Structure enveloppante (fig. VII-10 et VII-11). — C'est une variante de la précédente ; le bâti n'est plus seulement support des organes, il les enveloppe entièrement et seules en sortent les parties travaillantes et les commandes.



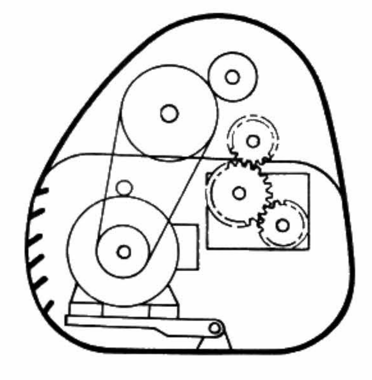


Fig. VII-10
Structure enveloppante

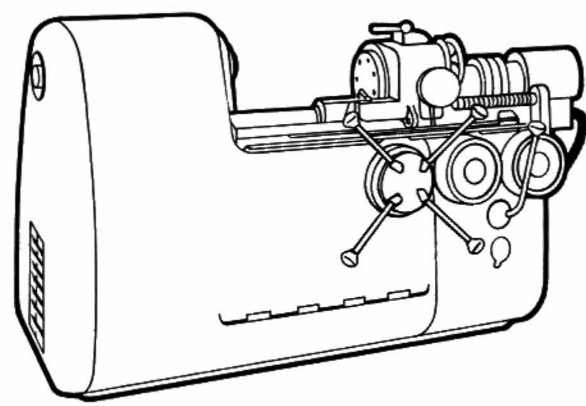


Fig. VII-11 — Bâti enveloppant

Cette structure est de plus en plus utilisée dans la construction des machines-outils car, statiquement, c'est la *section circulaire creuse qui a la plus grande rigidité à la flexion et à la torsion*. Il en est d'ailleurs ainsi pour toutes les sections creuses fermées par comparaison avec les sections creuses ouvertes. De plus, les parois bombées sont plus rigides aux vibrations que les parois planes, même nervurées. Employée correctement, la structure enveloppante ne demande que des parois peu épaisses et donne des bâtis légers. Les boîtes de vitesses, fixées à l'intérieur du bâti en tant qu'unités-caissons, participent à la rigidité par leur carter et les moteurs d'entraînement peuvent être facilement logés et aérés dans l'enveloppe.

La qualité la plus importante de cette structure est la rigidité statique et dynamique de l'ensemble moulé et la précision résultante avec laquelle la machine travaille. La forme d'une telle machine, toujours techniquement satisfaisante, est d'esthétique agréable.

2.3.5. Structure à ossature (fig. VII-12). — Elle consiste en une armature, faite de longerons et de montants assemblés, qui donne la rigidité statique. La rigidité dynamique est obtenue par des pièces formant cadre disposées à la suite les unes des autres et assemblées à l'aide de tirants. Le tout est recouvert d'une enveloppe. Compromis entre les structures à nervures et enveloppante, elle offre une accessibilité facile du mécanisme. L'enveloppe extérieure mobile, relevable ou démontable est souvent réalisée en alliage léger ou en tôle. Les machines de bureau modernes constituent, avec l'appareillage électrique, des exemples caractéristiques de ce mode de construction.

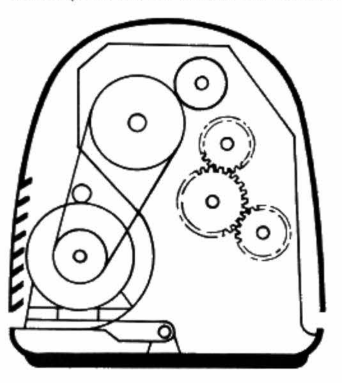


Fig. VII-12
Structure en ossature

2.4. Tracé des pièces facilitant la fonderie. (1)

2.4.1. Épaisseurs et raccordements des parois. — L'épaisseur des parois est le premier facteur qui doit être pris en considération car son influence s'exerce aussi sur les propriétés de la pièce obtenue. Les lois de la métallurgie font ressortir qu'une paroi plus épaisse, c'est-à-dire une pièce de fonte plus massive, aura une texture plus grossière car cette paroi se refroidit plus lentement dans le moule. Une paroi plus mince réunie à une paroi plus épaisse se solidifie

(1) Extraits de la documentation du Comité Européen des Associations de Fonderie.

plus rapidement et aura une texture plus fine. La métallographie permet de distinguer cette différence des textures. Il va de soi que presque toutes les pièces en fonte et notamment celles qui entrent dans le domaine de la construction des machines ont des épaisseurs de parois inégales. Le constructeur fera néanmoins son possible pour employer des parois dont les épaisseurs seront voisines et pour éviter les transitions brutales. Le passage d'une épaisseur à l'autre sera donc effectué graduellement.

Par ailleurs, comme tous les métaux, la fonte se dilate sous l'action de la chaleur et se contracte par suite du refroidissement, cette contraction étant généralement connue sous le nom de *retrait* pour les pièces de fonderie. Parmi tous les alliages moulables, la fonte grise se distingue par le plus faible retrait; néanmoins, son retrait doit être pris en considération. Or, ce retrait se fait en deux temps: le retrait solide ou extérieur et le retrait liquide ou intérieur. On peut compenser le premier par les dimensions du modèle, mais le développement de la texture lors de la solidification des différentes pièces en fonte se fait sous la seule influence du retrait intérieur. Ce retrait intérieur est plus important que le retrait extérieur et il conditionne la modification de la texture aux transitions des épaisseurs des parois, aux raccordements et aux entassements de matière. La texture de deux parois d'épaisseur différente sera toujours différente mais le point critique est à la transition. Si la différence des épaisseurs est considérable, la zone de transition peut même être le lieu d'une perturbation de la texture, perturbation qui se manifeste sous forme d'une texture peu cohérente, de zone de ravalement ou de déchirures et même par la formation de cavités plus ou moins grandes. Ce phénomène métallurgique porte le nom de *retassement*. Il peut se produire dans l'intérieur de la paroi mais aussi à sa surface. Le retassement extérieur se manifeste essentiellement dans les transitions angulaires des épaisseurs des parois.

Le danger du retassement doit être pris en considération lors du tracé des pièces car il est très difficile d'y faire face au cours du moulage. La possibilité d'éviter le retassement dépend surtout de la forme géométrique de la pièce ou de sa configuration plus ou moins compliquée. De ce fait, le constructeur s'efforce de réduire les différences entre les épaisseurs, d'imposer aux transitions d'une épaisseur à l'autre une allure graduelle et d'éviter tous les entassements de matière.

1° *Changement d'épaisseur sur une paroi droite* (fig. VII-13). — *a* est un exemple de transition incorrecte perturbant la texture, ce qui nuit à la qualité de la fonte en réduisant notamment la résistance à la traction et à la flexion de la pièce. La transition doit au moins comporter un rayon comme *b* et, si la construction le permet, on préconise une transition progressive comme *c*.

Fig. VII-13

Variations d'épaisseur dans une pièce coulée droite

2° *Raccordement de deux parois de même épaisseur* (fig. VII-14). — Un rayon intérieur et une arête vive à l'extérieur comme *a* entraînent toujours dans l'angle une perturbation de la texture qui peut aller jusqu'à la formation d'une cavité et réduire considérablement la résistance mécanique de la pièce. Si, comme *b*, on réduit le rayon intérieur, on limite en même temps l'accumulation de matière dans la zone de transition et le danger de retassement correspondant, mais il peut encore arriver qu'un retassement se forme dans l'angle. Un raccordement par de grands rayons donnant une épaisseur constante, comme *c*, est préconisé.

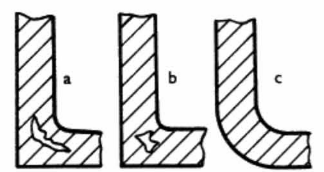


Fig. VII-14

Pièces angulaires sans changement de l'épaisseur de paroi

3° *Raccordement de parois d'épaisseurs différentes* (fig. VII-15). — La transition angulaire d'une paroi épaisse à une paroi mince obéit à des règles similaires aux précédentes. Une transition brutale avec un petit rayon intérieur, comme *a*, occasionne inévitablement une perturbation considérable de la texture dans la zone de transition et y réduit la résistance mécanique. Si le rayon intérieur est devenu plus grand, comme *b*, la construction est beaucoup plus favorable du point de vue de la technique de fonderie. On préconise une paroi mince qui s'épaissit de manière progressive jusqu'à ce qu'elle atteigne le rayon intérieur, comme *c*. Dans ce cas, la transition graduelle de la section mince à la section épaisse est telle que la texture reste la même.

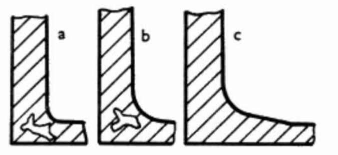


Fig. VII-15

Pièces angulaires à différentes épaisseurs de paroi

4° *Méthode des cercles inscrits*. — M.A. Heuvers, à la suite d'une série d'essais, a constaté que les masses de métal ou les volumes en deux points d'épaisseurs différentes coïncident avec les surfaces des cercles inscrits en ces points. Par conséquent, en comparant les cercles inscrits, on peut se rendre compte de la différence en volume des épaisseurs des parois et de la progressivité de leurs zones de transition. Les figures suivantes sont des exemples d'application de la méthode des cercles inscrits et montrent comment des difficultés et des échecs dans la fabrication de pièces moulées peuvent être évités par un tracé favorable des pièces dès le stade de la conception du produit.

— Figure VII-16 a: le raccordement de parois de différentes épaisseurs n'est pas recommandable en soi et les cercles inscrits dans les différentes parois font ressortir la différence entre les surfaces, qui est considérable, surtout le cercle inscrit au point de jonction.

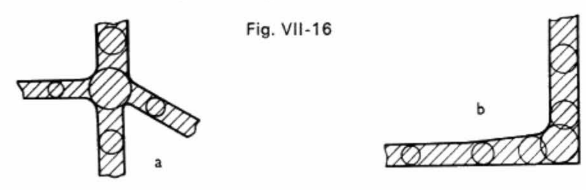


Fig. VII-16

— Figure VII-16 b: dans une transition graduelle de la paroi faible à la paroi épaisse, l'accroissement et la réduction graduels des cercles inscrits donnent la garantie d'un raccordement de texture saine.

— Figure VII-17 a: dans cette section transversale d'un anneau compliqué, dont une partie est l'objet d'un moulage au naturel tandis que l'autre est le résultat d'un noyautage, les cercles inscrits montrent une transition brusque d'une paroi mince à une paroi trois fois plus épaisse. À un point de l'anneau, dans la zone de transition, on constate des retassements plus ou moins importants.



Fig. VII-17

— Figure VII-17 b: le tracé a été amélioré par la méthode des cercles inscrits. Les épaisseurs de parois sont graduellement renforcées et les retassements ont disparu; toutes les pièces de la même série présenteront une texture irréprochable.

— Figure VII-18 a: dans ce tracé initial de la pièce, la section transversale fait ressortir l'importance de la transition en comparant le grand cercle avec le petit. Dans ces conditions, des difficultés de fonderie seraient inévitables (retassements extérieurs).

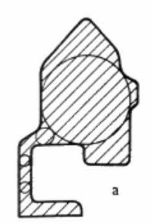
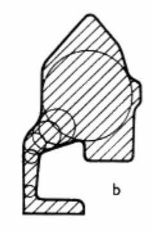


Fig. VII-18



— Figure VII-18 b : la modification du tracé assurant une transition graduelle des épaisseurs des parois donnera satisfaction du point de vue du fondeur.

5° *Raccordement de plusieurs parois.* — La jonction de quatre parois de même épaisseur par de grands rayons donne une zone d'entassement où la texture sera très mauvaise (retassement, fig. VII-19 a) ; avec des rayons réduits,



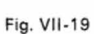
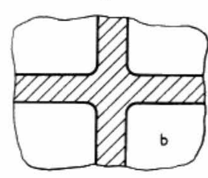


Fig. VII-19



le mode d'exécution est déjà plus favorable et l'irrégularité inévitable de la texture n'aura pas de conséquences fâcheuses (fig. VII-19 b). Le raccordement de deux parois minces opposées sur une paroi épaisse doit comporter des zones de transition progressive des parois minces (fig. VII-20 b) pour éviter les inconvénients d'un raccordement sans transition (fig. VII-20 a et 21 a). On recommande d'éviter ces raccordements en croix auxquels il faut préférer, si la construction le permet, des raccordements décalés (fig. VII-21 b). On préconise une transition d'épaisseur de la paroi mince et une diminution de l'entassement aux points de jonction pour supprimer toute irrégularité de la texture (fig. VII-21 c).



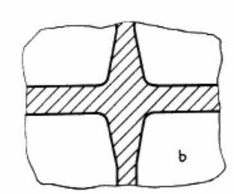
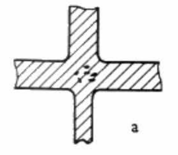
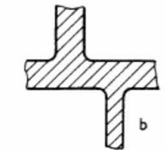


Fig. VII-20





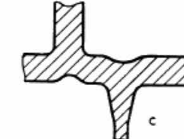
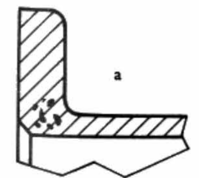


Fig. VII-21 — Exemples de raccordements

2.4.2. Exemples de pièces correctes. — Ces exemples montrent les avantages qui résultent d'une conception bien adaptée à la fonderie et la comparaison des types de construction ancien et moderne pour une même pièce met en évidence l'importance de la collaboration entre le constructeur de machines et le fondeur.

1° *Raccordement d'une bride* (fig. VII-22). — La transition de l'épaisseur de la paroi du carter (pente de 4°, fig. VII-22 b) permet d'obtenir une bride saine, exempte de défauts de fonderie.



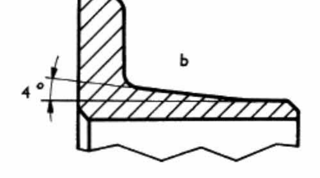


Fig. VII-22 — Raccordement d'une bride sur un carter

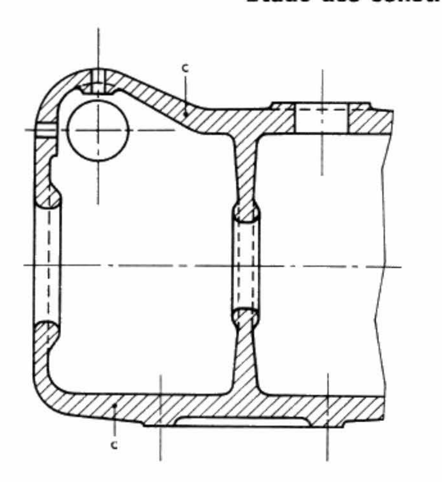


Fig. VII-23

Carter d'engrenages

2° *Carters d'engrenages.* — Un carter dont les épaisseurs varient progressivement (*c*, fig. VII-23) donne des pièces de fonderie de bonne qualité. Une cloison de renforcement épaisse et nervurée (*b*, fig. VII-24) raccordée directement aux paliers élimine les risques de rebuts dus aux jonctions *c* et aux parties très fragiles *a* du noyau (fig. VII-25).

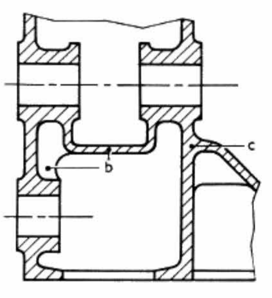


Fig. VII-24 — Carter

Fig. VII-25 — Carter

2.4.3. Tensions de moulage et tensions internes

1° *Tensions de moulage.* — Elles sont une autre conséquence des phénomènes de retrait ; en effet, le processus normal de retrait général de la pièce est entravé par le moule. Ce phénomène est aggravé par des différences de sections ; les parties minces, solidifiées les premières, subissent alors des tensions suffisantes pour provoquer des fissures. Ainsi, pour un carter d'accouplement (fig. VII-26 a et b) les pièces moulées présentaient des fissures isolées dans la zone indiquée dont la section *BB* était trop faible par rapport aux sections *AA* et *CC* qui sont ancrées sur le noyau par la forme de la pièce et par les nervures. Pour empêcher ces fissures, le tracé a été modifié et le renforcement de la section *BB* lui permet de supporter les tensions de moulage sans inconvénient.

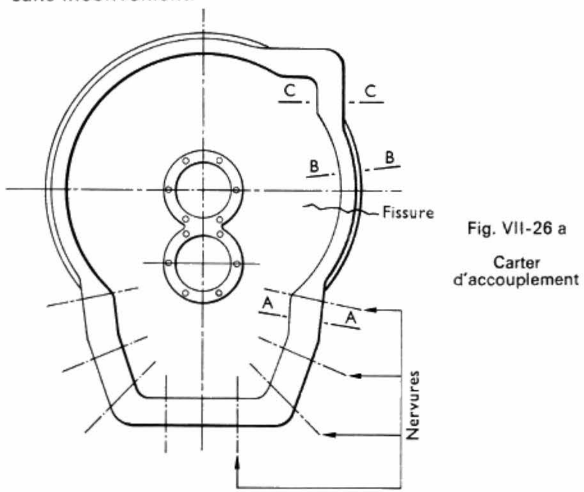


Fig. VII-26 a

Carter d'accouplement

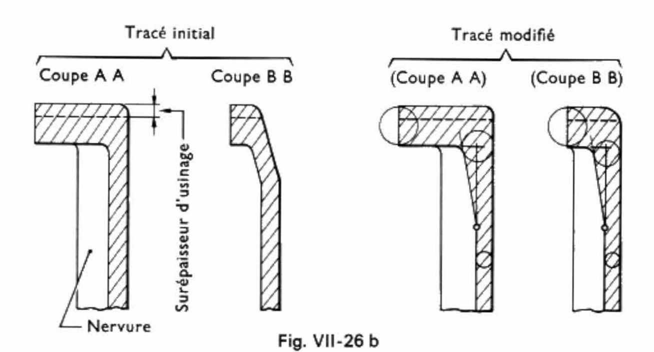


Fig. VII-26 b

2° *Tensions internes.* — Dans le cas d'une épaisseur importante, les parties de la section en contact avec la paroi du moule se refroidissent plus vite que le milieu et il en résulte un phénomène de tensions internes : après refroidissement complet, le centre de la pièce est en traction et les couches extérieures en compression. Ces tensions internes peuvent aussi se développer entre des parties de sections différentes et donnent alors un voilage ou une torsion définitifs de la pièce moulée. Ce risque est à redouter particulièrement pour les pièces longues comme, par exemple, les bancs de tours dont la section la plus grande se refroidit plus lentement et est soumise aux tensions de traction qui provoquent un voilage concave de son côté (fig. VII-27), les parties minces qui se refroidissent plus vite étant soumises à des tensions de compression.

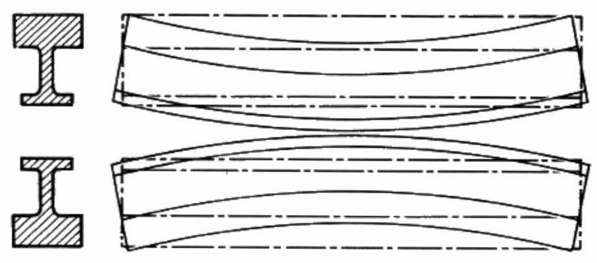


Fig. VII-27 — Voilage longitudinal selon la position de la poutre

Il faut donc tenir compte de ces tensions internes dès la conception de la pièce, surtout si celle-ci est très longue : sur un banc de tour de 10 m, par exemple, si la section était telle que *a* (fig. VII-28) le voilage atteindrait 30 à 40 mm et les pièces moulées seraient inutilisables. On adopte en réalité une section telle que *b* (montants renforcés en *c*) dans laquelle les tensions de traction et de compression des différentes parties s'équilibrent au maximum donnant un voilage minime même pour des longueurs plus importantes.

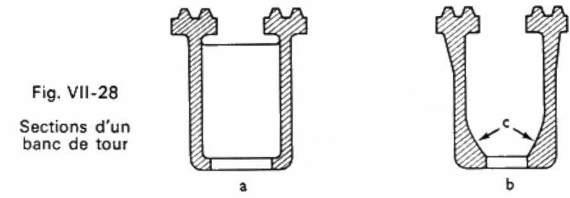


Fig. VII-28

Sections d'un banc de tour

2.4.4. Banc de tour moderne. — Dans un banc de tour, la liaison des deux montants (du tube *b*, V. fig. VII-28), par des nervures en diagonale (dites de « Peter » ; fig. VII-29) est considérée comme la plus appropriée aux points de vue résistance, rigidité et tensions internes. Cependant, les rendements élevés des tours de production occasionnent la formation d'un volume de copeaux considérable dont l'évacuation est entravée par ces nervures en diagonale. Pour faciliter cette évacuation, des nervures droites seraient préférables (fig. VII-30) mais cette construction est insuffisante pour supporter les importants efforts statiques et dynamiques de ces machines. Aussi, des formes nouvelles ont-elles été créées pour répondre à la fois aux exigences de fonderie et à celles d'utilisation (fig. VII-31). Les montants sont reliés par des nervures droites *a* dont la section creuse a une

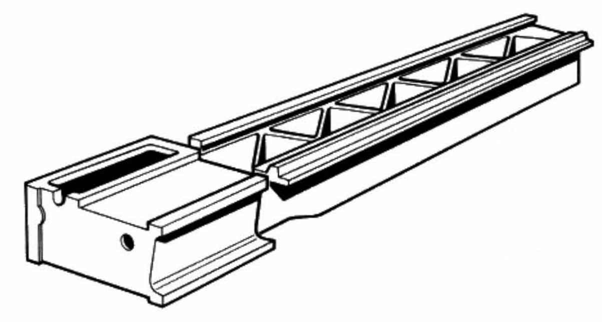


Fig. VII-29 — Banc de tour à nervures « de Peter »

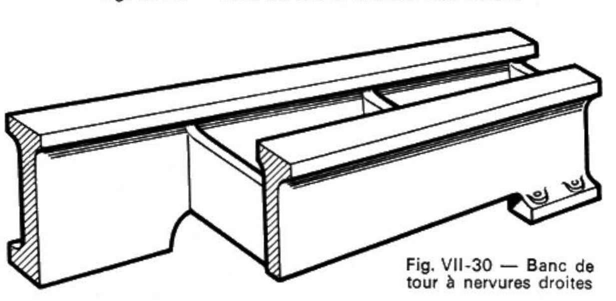
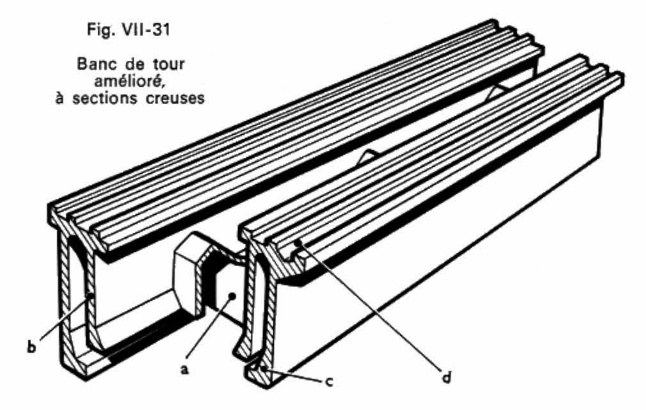


Fig. VII-30 — Banc de tour à nervures droites

grande rigidité. De plus, les montants sont en réalité des montants doubles *b*, ce qui augmente la rigidité à la torsion. Enfin, la section des montants tient compte des problèmes de tensions internes en *c* et *d*. Cet exemple montre à quelles exigences les techniques de fonderie doivent faire face pour répondre aux progrès techniques récents et à quel point la collaboration fondeur-constructeur est nécessaire.

Fig. VII-31

Banc de tour amélioré, à sections creuses



2.4.5. Collaboration entre constructeur, fondeur et modeleur. — Pour la conception et la réalisation de pièces de fonderie complexes, on doit, pour parvenir à la meilleure solution, respecter les règles ci-après. Dès qu'un projet de pièce ou de machine a été esquissé par le bureau d'études du constructeur, le spécialiste de la fonderie doit être appelé en consultation. Il est indispensable que le constructeur pose alors exactement son problème : il doit préciser si les pièces doivent résister à des contraintes mécaniques, au frottement, à la corrosion, aux basses ou aux hautes températures, si elles doivent être étanches ou si elles ne jouent qu'un rôle d'enveloppe de protection. À partir de ces éléments, le fondeur fait une rapide étude de moulage et apporte ses premières observations à la suite desquelles le constructeur établit le dessin définitif qui spécifie le matériau, les tolérances dimensionnelles et les états de surface de la pièce brute, les surfaces de départ et les surépaisseurs d'usinage, les traitements éventuels et les méthodes de contrôle. Ce dessin est soumis au fondeur pour accord définitif ; dans les cas difficiles, cette navette peut s'effectuer plusieurs fois.

À ce stade seulement, le service Méthodes de la fonderie peut lancer l'étude de moulage qui est elle-même soumise au modeleur avec le maximum de renseignements sur la conception et la fabrication du modèle.

Le modeleur ne devrait pas exécuter un modèle, lorsqu'il reçoit une commande du constructeur accompagnée du seul dessin de la pièce, sans connaître l'avis du fondeur qui coulera ces pièces. En effet, seule une collaboration efficace des trois parties permet d'atteindre l'économie maximale en respectant la sécurité en service. C'est d'ailleurs en grande partie l'élément prix de revient qui justifie la pièce moulée pour les constructeurs.

3. BÂTIS SOUDÉS

3.1. Généralités. — La construction d'un bâti par soudage est tout indiquée dans le cas de fabrication d'une très petite quantité de pièces qui ne permettrait pas l'amortissement du coût d'un modèle pour le moulage. Par ailleurs, il est avantageux pour les pièces de très grandes dimensions, telles que les bâtis de presses, les cuves de transformateurs. Les avantages du soudage sont en premier lieu la légèreté : le calcul montre que, à égalité de rigidité, le gain de poids peut atteindre 50 % par rapport à la solution moulée (les caractéristiques mécaniques de l'acier étant supérieures à celles de la fonte). La réalisation est souvent plus économique, malgré le coût plus élevé des matériaux soudables car l'outillage utilisé est en général plus simple, l'usinage est plus facile et le nombre des pièces rebutées est réduit (absence des éventuels défauts de fonderie). Les pièces plus légères et moins fragiles sont manutentionnées plus facilement. L'exécution est plus rapide puisqu'il n'y a pas de délai nécessaire pour réaliser le modèle. Pour la même raison, toute modification de la pièce peut être réalisée immédiatement.

Cependant, ces avantages ne doivent pas faire perdre de vue certains inconvénients. D'abord, ce procédé d'assemblage ne s'applique qu'aux métaux soudables possédant un degré de pureté suffisant, d'où une incidence sur le prix de revient. Par ailleurs, la forme des éléments assemblés doit permettre le soudage, les cordons de soudure devant être tous accessibles. Un traitement thermique de recuit après soudure est nécessaire pour des pièces qui devront être exemptes de déformations ultérieures (tensions internes dues au retrait après chauffe). Enfin, un traitement anticorrosion est souvent recommandé car la soudure crée une hétérogénéité de structure qui favorise l'oxydation.

3.2. Déformations après soudure. — Le soudage met en jeu des températures très hétérogènes : c'est une opération essentiellement anisothermique. Les parties chaudes tendent à se dilater mais ne peuvent vaincre la résistance des parties froides : elles sont comprimées et refoulées plastiquement. Au refroidissement, leur retrait s'opère donc à partir de dimensions plus faibles que leurs dimensions d'origine et, comme ce retrait n'est pas libre puisque les parties froides s'y opposent, il en résulte des tensions internes importantes.

Lorsque les pièces soudées sont libres de se mouvoir (de jouer), les déformations dues au retrait sont maximales et les tensions sont pratiquement nulles. Si les pièces sont bridées ou encastrées, le retrait ne peut se faire et les tensions sont maximales. Dans des pièces de forte section ou de grande épaisseur, ces tensions sont plus faibles que dans des pièces plus petites ou plus minces. Dans le premier cas, ce sont les soudures qui subissent les tensions maximales. Pour limiter les déformations et les tensions après soudure, il est nécessaire de prendre certaines précautions qui peuvent être utilisées simultanément ou non.

1° *Déformation préalable.* — Elle doit être en sens contraire de la déformation prévue de l'élément considéré ; cette méthode, très rationnelle, est parfois insuffisante ou de mise en œuvre difficile.

2° *Répartition de l'échauffement.* — On l'obtient en réalisant l'une après l'autre des portions non contiguës du joint. Ces portions peuvent être symétriques (sens de soudure inversés) limitées ou opposées (même sens de soudure), ou exécutées par la méthode par rebroussement (dite à pas de pèlerin ; fig. VII-32).

3° *Retardement du bridage.* — Cette méthode consiste à souder les différentes portions d'un joint dans un ordre tel que chacune d'elles soit exécutée sur pièces non bridées. De ce fait, elle concourt à une réduction considérable des

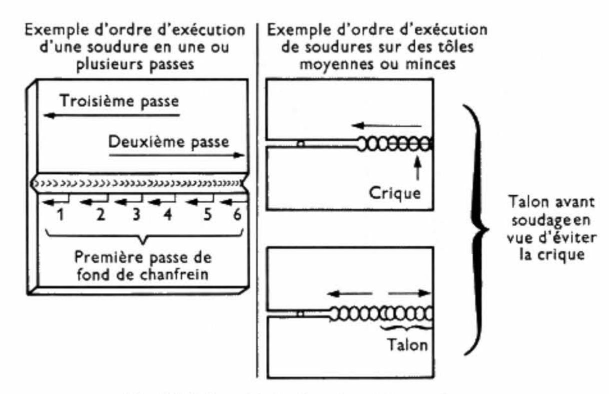


Fig. VII-32 — Limitation des déformations

tensions. Recommandable pour les pièces en matériaux fragiles (de moulage, par exemple), c'est la meilleure méthode pour le soudage de pièces massives ou de tôles de fortes épaisseurs. Elle permet de diminuer les contraintes dans les soudures en cours du soudage.

4° *Préchauffage et post-chauffage des éléments.* — Ils permettent surtout d'éviter la concentration des tensions internes dans les soudures et dans les éléments minces en égalisant les retraits. De plus, ils éliminent le risque de formation de zones dures donc fragiles par trempe locale des pièces au voisinage des soudures.

3.3. Conception des pièces soudées (fig. VII-33 et VII-34).

3.3.1. Conception des joints. — Les criques ou fissures de retrait dans le métal déposé ou dans le métal de base résultent de l'existence, dans les constructions soudées, de contraintes de retrait élevées. Elles risquent d'autant plus de se produire que les aciers de base sont plus chargés en carbone. Le moyen le plus rationnel d'éviter ces défauts consiste à prendre un certain nombre de précautions à la

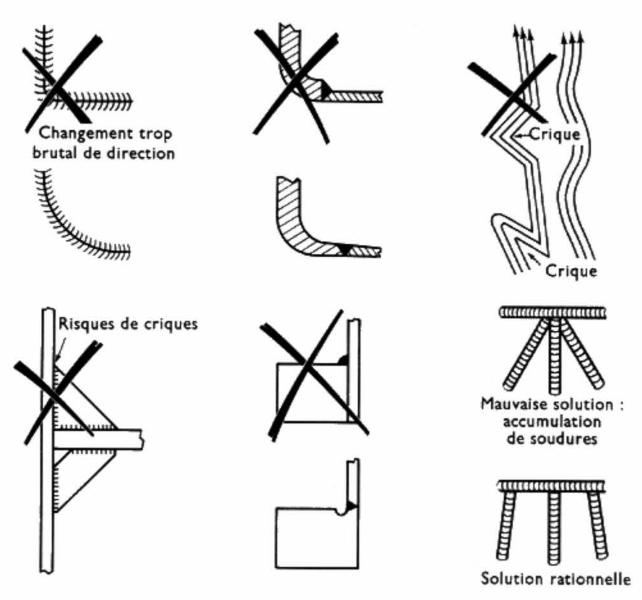


Fig. VII-33 — Conception des joints soudés

conception. On doit éviter les accumulations de soudures et les soudures trop rapprochées. Des sections de soudure trop importantes sont néfastes. Ainsi, sur des constructions de sécurité, il faut prévoir, si possible, une reprise des soudures à l'envers, plutôt que d'imposer l'exécution de soudures pénétrées de forte section.

L'emploi de soudures discontinues est préconisé. Il faut prohiber tout bridage exagéré, surtout lors de l'exécution d'une soudure de fermeture (c'est-à-dire la dernière soudure). Ces défauts de conception peuvent être éliminés par

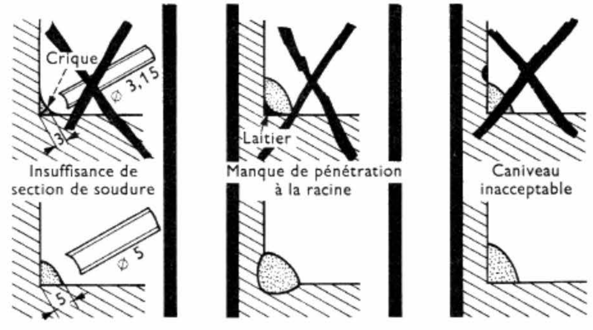


Fig. VII-34 — Défauts du cordon de soudure : ils aggravent les défauts de conception

un plan de soudage rationnel définissant l'ordre d'exécution des soudures. Il faut également veiller à une répartition homogène des contraintes dues aux sollicitations en service donc choisir des formes qui ne comportent pas de brusques changements de section et par conséquent éviter les soudures entre pièces de masse trop différente (goussets, brides).

3.3.2. Bureau d'études et soudage. — Il est souhaitable que le dessinateur collabore avec le soudeur et que le bureau d'études tienne compte des éléments ci-après. Il ne faut utiliser des matériaux *difficilement soudables* qu'en cas d'obligation formelle ; toutefois, un matériau ne doit pas avoir cette réputation parce que sa mise en œuvre en soudage implique un préchauffage (aciers dits à haute limite élastique, par exemple). La qualité primordiale d'une construction soudée réside avant tout dans *la simplicitié de sa forme :* la sobriété de conception est de règle ; elle conduit d'ailleurs à des formes plus agréables (fig. VII-35). Pour

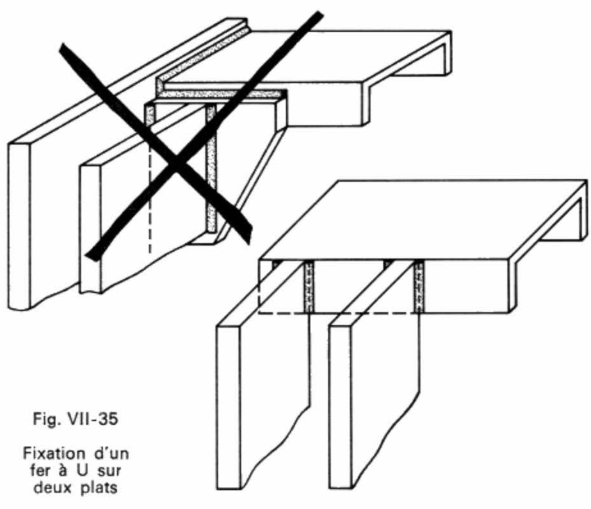


Fig. VII-35

Fixation d'un fer à U sur deux plats

faciliter l'exécution, il est recommandé de réaliser préalablement des *éléments unitaires simples :* exécutés séparément, ils seront ensuite soudés entre eux. Les retraits sont ainsi plus facilement maîtrisés et les frais de manutention diminués. Tout joint doit être facilement accessible au soudeur, à sa pince et à une électrode de 350 mm. De plus,

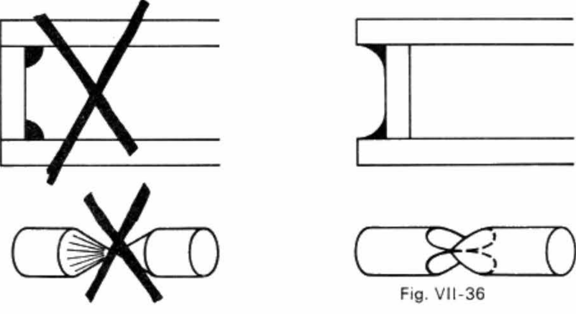


Fig. VII-36

Accessibilité des soudures

l'électrode devra pouvoir être tirée et non poussée (fig. VII-36). Un nombre minimal de joints est synonyme de technique rationnelle mais surtout d'économie : on peut dire que le coût et la valeur des tensions internes d'une construction sont proportionnelles au nombre et au volume des soudures. Une soudure d'angle *surabondante* ou une soudure bout à bout trop chargée sont néfastes techniquement : elles diminuent la résistance mécanique et augmentent le prix de revient d'une pièce (fig. VII-37).

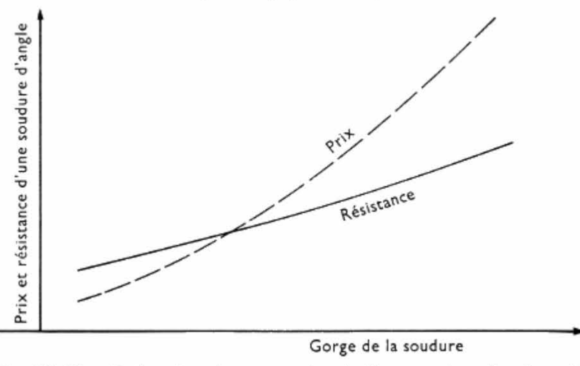


Fig. VII-37 — En fonction de sa gorge le prix d'une soudure d'angle croît beaucoup plus vite que sa résistance

Il est recommandé de faire coïncider les soudures avec les axes de symétrie des pièces ou avec leurs axes neutres ou bien de les placer symétriquement par rapport à ces axes (fig. VII-38). Une construction soudée étant avant tout un

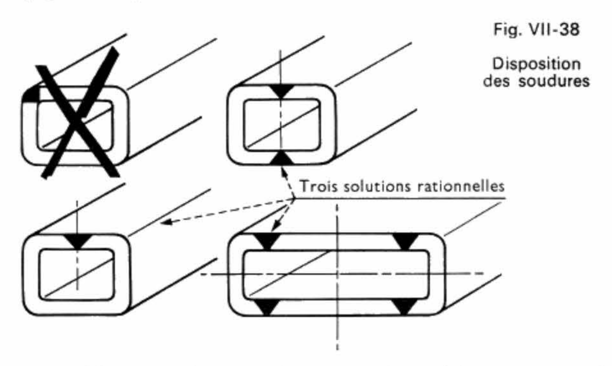


Fig. VII-38

Disposition des soudures

ensemble monobloc, elle s'accommode mal de goussets qui augmentent les tensions internes et limitent sa libre déformabilité : généralement inutiles (fig. VII-39), ils sont souvent nuisibles (fig. VII-40). Si des renforts sont nécessaires, ils doivent avoir une dilatation libre (fig. VII-41).

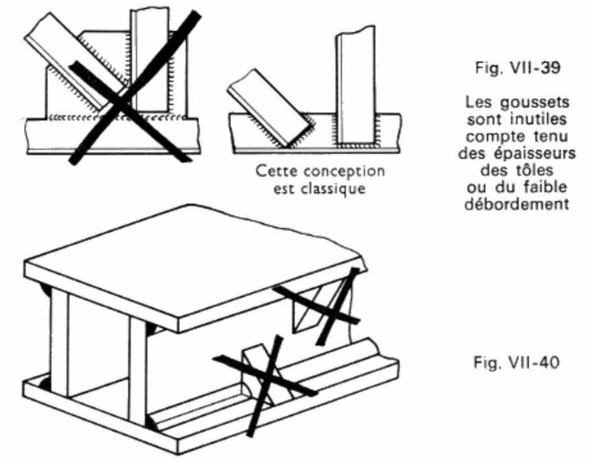


Fig. VII-39

Les goussets sont inutiles compte tenu des épaisseurs des tôles ou du faible débordement

Fig. VII-40

La conception d'une pièce travaillant sous *efforts statiques* peut être souvent différente de celle subissant des *efforts de fatigue.* Les règles, concernant le danger consécutif à des changements brusques de section et l'influence désastreuse des amorces de criques, sont à respecter

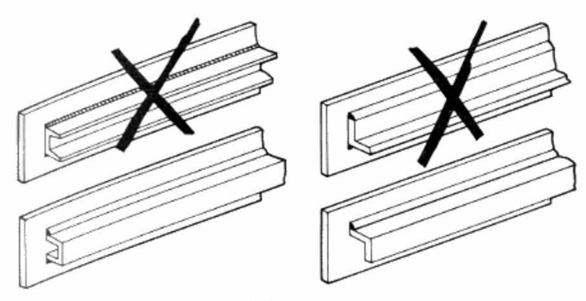


Fig. VII-41 — Renforts

scrupuleusement lors de l'étude d'une construction travaillant à la fatigue.

Il faut prévoir assez largement les *surépaisseurs d'usinage* pour tenir compte des déformations dues au retrait ou à un traitement thermique ultérieur. Enfin, le positionnement des pièces à souder sur un montage est très favorable : il permet une amélioration de la qualité des soudures (caractéristiques mécaniques et présentation) et assure un gain de temps (utilisation d'électrodes de plus gros diamètres).

3.3.3. Préparation des éléments. — La phase préliminaire de la réalisation d'un bâti soudé est le découpage des éléments laminés qui se fait essentiellement par l'oxycoupage. La netteté des coupes obtenues avec un chalumeau à main et la vitesse d'exécution dépendent de l'habileté de l'opérateur. L'oxycoupage automatique donne une vitesse de coupe uniforme et est utilisable pour n'importe quel tracé. C'est par excellence le moyen de réaliser économiquement des coupes de pièces très épaisses ; il permet de remplacer des pièces coulées, forgées ou estampées par des pièces découpées. Sa précision de coupe est telle que, souvent, on peut se dispenser d'un usinage ultérieur. Le développement de l'oxycoupage est considérable et de nouvelles techniques permettent maintenant de découper l'acier inoxydable, la fonte et le bronze aussi facilement que l'acier doux.

3.4. Exemples de bâtis soudés. — Alliée aux possibilités de l'oxycoupage, la soudure permet d'obtenir des pièces aussi complexes qu'une colonne de machine-outil (fig. VII-42). La souplesse du procédé conduit à plusieurs solutions possibles pour un même problème, le critère de choix est alors l'esthétique ou le prix (fig. VII-43). Enfin des ensembles de très grande résistance tels que des bâtis de presse sont maintenant courants (fig. VII-44).

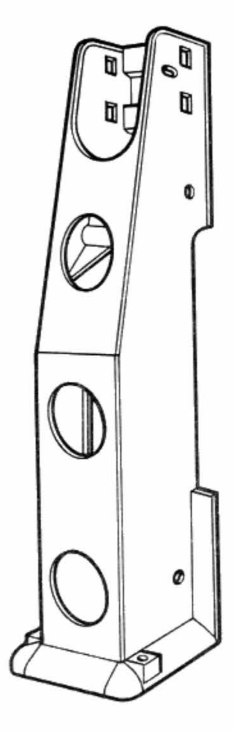


Fig. VII-42

Colonne de machine-outil soudée

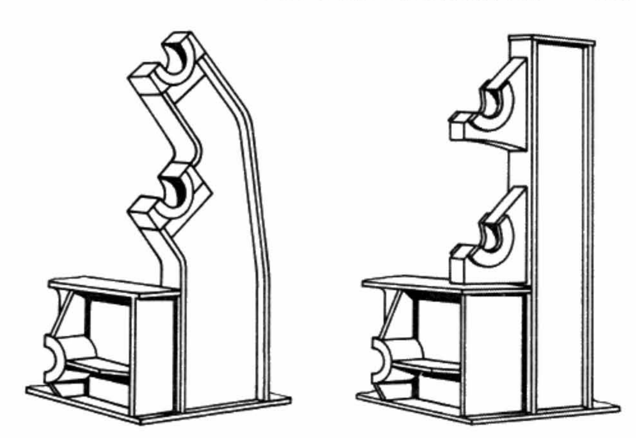


Fig. VII-43 — Deux solutions soudées pour un bâti

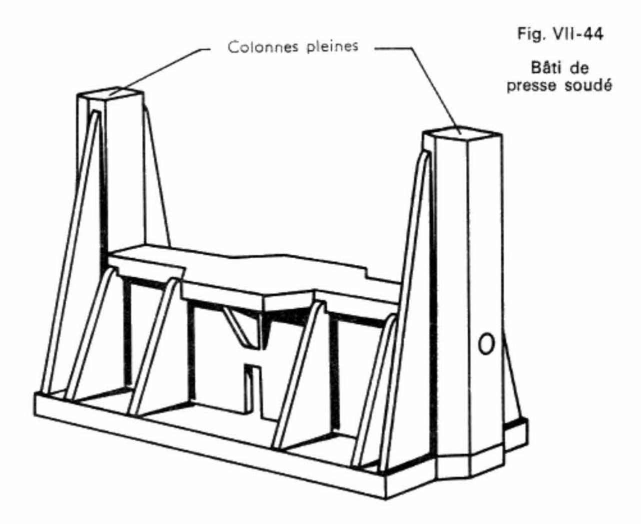


Fig. VII-44

Bâti de presse soudé

4. BÂTIS EMBOUTIS

4.1. Généralités. — Afin de réaliser des formes creuses non développables, on peut emboutir par déformation à froid une tôle plane au moyen d'un poinçon pénétrant dans une forme creuse ou matrice, l'épaisseur de la tôle devant rester sensiblement constante. La forme initiale de la tôle découpée ou flan est déterminée par le calcul, sa surface étant sensiblement égale à celle de la pièce à obtenir. Dans le cas d'un emboutissage profond, il faut procéder à plusieurs opérations successives entre lesquelles un recuit est nécessaire pour supprimer l'écrouissage. Ce procédé permet d'obtenir des pièces légères et de dimensions limitées en raison de la difficulté de réalisation et du coût de l'outillage. Il ne convient que pour des pièces creuses de faible épaisseur donc subissant des efforts modérés. Rapide, la fabrication par emboutissage est économique si une série importante permet l'amortissement de l'outillage.

4.2. Choix des formes. — L'emboutissage ne peut être réalisé que sur des métaux très malléables à froid (acier doux et aluminium). Il faut prévoir des congés de raccordement importants entre les divers éléments de la forme générale. La réduction de l'épaisseur, au minimum compatible avec la résistance et la rigidité, permet d'adopter des presses de puissance limitée pour l'emboutissage. Pour la réalisation de formes embouties étagées, les diamètres intérieurs doivent être décroissants pour permettre la sortie des poinçons. La profondeur doit être assez faible par rapport à la surface de base. On peut obtenir des formes complexes par l'assemblage de plusieurs éléments emboutis (soudure ou rivetage). Les sections choisies ont un moment d'inertie

(donc une rigidité) maximal. Elles sont souvent en U ou en V. Éventuellement, elles sont fermées par une tôle soudée par

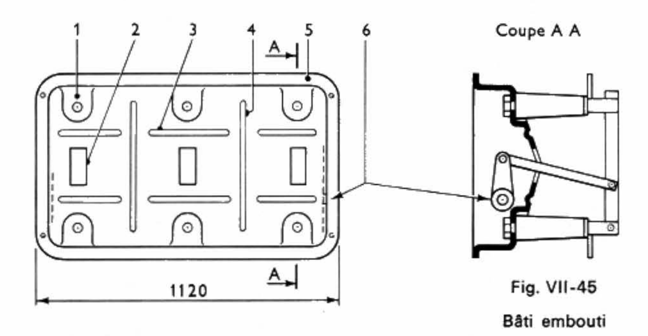


Fig. VII-45
Bâti embouti

points pour constituer un caisson peu déformable. La semelle ou la bride de jonction de deux pièces sont constituées par un simple rebord de la tôle autour de la partie emboutie, rebord qui augmente d'ailleurs la rigidité. Les bossages d'appuis pour organes de fixation, ainsi que les paliers de guidage des arbres (ce sont des parties épaisses) sont généralement rapportés par soudure. Les trous et les ouvertures indispensables sont réalisés par découpage à la presse, avant, pendant ou après l'emboutissage; ils réduisent la résistance de la pièce et il faut en tenir compte dans les calculs.

4.3. Exemple de réalisation. — L'interrupteur Magnétovisor Alsthom est monté sur un bâti monobloc (5) en tôle emboutie (fig. VII-45), de forme rectangulaire avec section en V; des cannelures longitudinales (3) et transversales (4) assurent la rigidité.

CHAPITRE VIII

TUYAUTERIE - ROBINETTERIE

Dès l'Antiquité, l'eau a posé le problème du transport continu des fluides, résolu initialement par des canaux ouverts où l'eau circulait par gravité. Il a fallu ensuite régler le débit puis avoir des canalisations étanches. Le développement de la grande industrie, l'extension des agglomérations urbaines, l'essor de l'industrie chimique, celui de l'industrie atomique et celui de l'industrie spatiale ont rendu le problème de plus en plus complexe. La variété des conditions d'emploi (nature, température et pression du fluide) a imposé, pour la réalisation des canalisations et de leurs accessoires, l'amélioration des matériaux usuels, la recherche et la mise au point des matériaux nouveaux.

La tuyauterie et la robinetterie sont associées à toutes les activités modernes et y occupent souvent un rôle de premier plan. Leur sécurité d'exploitation, dans des conditions de service en général sévères, exige de ces organes : résistance chimique, tenue mécanique et interchangeabilité facile.

1. TUYAUTERIE

Depuis les temps les plus anciens, les tuyaux ont été réalisés avec à peu près tous les matériaux solides. Cependant, les tubes usuels se sont très longtemps limités à l'acier, à la fonte, au plomb et au cuivre. Sous l'impulsion des besoins de l'industrie moderne toute une série de matériaux nouveaux est maintenant disponible sous forme de tubes (aciers inoxydables, fontes spéciales, alliages légers, matières plastiques, etc.), chaque qualité ayant été réalisée pour résister à des conditions bien déterminées de pression, de température, de passivité ou d'abrasion.

1.1. Tuyaux rigides

1.1.1. Tuyaux en fonte. — Ils sont d'un emploi courant pour les canalisations souterraines d'eau et de gaz. Coulés verticalement en sable, ils ont une longueur de 3 à 5 m; fabriqués par centrifugation (moule en sable ou moule métallique), ils atteignent 6 m. La résistance à la rupture de la fonte est au minimum de 14 daN/mm² pour les pièces coulées en sable, de 16 daN/mm² pour celles centrifugées en sable et de 20 daN/mm² pour celles centrifugées en moules métalliques. La coulée centrifuge permet, par ailleurs, d'obtenir une grande régularité d'épaisseur et améliore la texture du métal, facilitant l'usinage ultérieur. Il est possible d'augmenter la résistance de ces tuyaux et de diminuer les risques d'éclatement, au moyen de frettes en acier, posées à chaud avec ou sans interposition de plomb (fig. VIII-1). Ces tuyaux frettés réunissent l'inoxydabilité de la fonte et la solidité de l'acier. Ils offrent une grande sécurité par leur résistance aux coups de bélier et aux chocs extérieurs.

Les tuyaux en fonte destinés à être enterrés dans le sol doivent subir un goudronnage à chaud afin d'améliorer encore leur résistance à la corrosion.

Les tuyaux en fontes spéciales sont utilisés dans l'industrie chimique pour leur résistance à la corrosion. Les fontes employées sont à base de nickel (type Ni Resist à 14 % de nickel : facilement usinables et résistantes à la température, à la soude, à la potasse, à l'acide chlorhydrique et à l'acide sulfurique dilué), à base de chrome (type Nichromaz à 30 % de chrome : réfractaires et résistantes à la plupart des corrosions) ou à base de silicium (13 à 18 % de silicium : résistantes à toutes les corrosions sauf à celle de l'acide chlorhydrique mais très fragiles et inusinables, sauf à la meule).

1.1.2. Tuyaux en tôle. — Constitués par une tôle roulée, généralement de faible épaisseur, dont l'assemblage est effectué par soudage, rivetage ou agrafage, ils sont utilisés pour le transport des gaz à très faible pression, les conduits de fumée, de ventilation et d'aération.

1.1.3. Tuyaux en acier. — Les tuyaux en acier, plus légers que ceux en fonte, offrent une plus grande résistance mécanique et sont les plus employés. Ils sont élastiques et résistent bien aux chocs mais ils ont une résistance à la corrosion moins bonne que la fonte et il ne faut pas les utiliser tels quels dans les installations souterraines où ils seraient rapidement mis hors d'usage; il est nécessaire de les protéger par un asphaltage ou goudronnage à chaud, intérieur et extérieur, cette protection étant complétée par l'enroulement extérieur d'une bande de jute imprégnée d'asphalte. De nouveaux procédés de revêtement à base de produits bitumineux et de soie de verre permettent d'augmenter leur résistance à la corrosion dans les sols particulièrement agressifs. Pour les tuyauteries aériennes, la durée est améliorée par une galvanisation.

Il existe deux catégories de tubes d'acier : les tuyaux sans soudure et les tuyaux soudés. Les tubes sans soudure sont obtenus par étirage d'un lingot ou d'une ébauche creuse. Les tubes soudés sont réalisés par la mise en forme

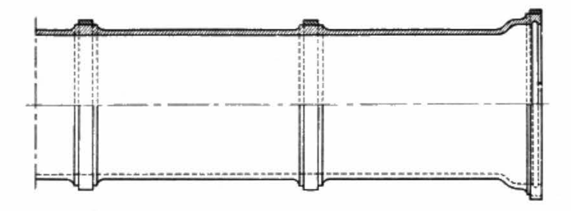


Fig. VIII-1 — Tuyau en fonte fretté

préalable d'un produit plat, le soudage des deux lèvres étant exécuté suivant une génératrice ou, plus rarement, suivant une hélice. Le soudage peut être réalisé à l'arc électrique, par résistance, par la combustion d'un gaz ou à l'hydrogène atomique.

1° *Tubes « gaz »*. — Destinés à être assemblés par vissage (filetage conique « gaz »), leur diamètre extérieur varie de 10,2 à 114,3 mm et ils sont classés en trois catégories suivant leur épaisseur : 1,8 à 3,65 mm, série légère (NF E 29-027), de 2 à 4,5 mm, série moyenne (NF E 29-025) et de 2,65 à 5,4 mm, série forte (NF E 29-026). Généralement en acier (acier doux), ces tubes sont fabriqués par les procédés sans soudure ou soudés, sauf en série légère où ils sont exclusivement soudés. Ils sont livrés en longueurs variant de 4 à 7,5 m soit avec filetages coniques aux deux extrémités, soit non filetés. Leur surface peut être noire, galvanisée, revêtue d'un vernis bitumineux ou d'un complexe bitume et soie de verre. La pression d'épreuve hydraulique est de 50 bars pour les tubes soudés et de 60 bars pour les tubes sans soudure. On les désigne par leur dénomination anglaise en pouces (de 1/8 à 4) suivie de l'indication de la série et de l'état de surface.

2° *Tubes lisses*. — Ces tubes sont destinés aux tuyauteries assemblées par soudage ou par brides. La norme NF A 48-004 donne une vue d'ensemble de leurs dimensions. Les tubes sans soudure étirés à froid (norme NF A 48-001) ont des diamètres extérieurs allant de 6 à 193,7 mm et des épaisseurs de 1 à 10 mm ; ils sont livrés à l'état recuit après avoir subi une épreuve d'étanchéité de 60 bars. Les tubes sans soudure étirés à chaud (norme NF A 48-005) ont des diamètres extérieurs allant de 33,7 à 419 mm et des épaisseurs de 2,3 à 20 mm. Les longueurs courantes s'étagent de 3,5 à 7,5 m. Ils subissent également l'épreuve d'étanchéité à 60 bars.

3° *Tuyaux de grand diamètre*. — Réalisés en tôle d'acier soudée, leur diamètre peut atteindre 4 à 5 m. L'épaisseur varie avec les conditions d'utilisation et peut atteindre 60 mm. Ils sont principalement utilisés dans les aménagements hydroélectriques (conduites forcées) et réalisés en acier au chrome-cuivre.

Pour éviter l'utilisation d'épaisseurs excessives qui demanderaient des moyens de fabrication extrêmement puissants, divers artifices sont utilisés :

— Tuyaux autofrettés : des frettes d'un diamètre légèrement plus grand que celui du tuyau sont engagées sur celui-ci que l'on met progressivement en pression ; la paroi s'allonge, dépasse sa limite élastique, plaque contre les frettes et détermine dans celles-ci des tensions. Une fois la pression ramenée à zéro, les frettes sont encore tendues et déterminent sur la paroi un serrage énergique. On peut également, au lieu de frettes, utiliser un câble à haute résistance enroulé en hélice.

— Tuyaux surpressés : le principe consiste à produire dans le métal du tube une déformation permanente par traction, l'écrouissage obtenu élevant la charge de rupture et la limite élastique du métal. On place le tuyau dans un moule légèrement plus grand et on le soumet à une pression hydraulique progressivement croissante, le tuyau se dilate au-delà de la limite élastique du métal jusqu'à l'arrivée en contact avec la surface interne du moule.

4° *Tuyaux en aciers spéciaux*. — Dans le cas de tuyauteries soumises à des températures élevées ou à des actions corrosives, on utilise des aciers spéciaux dont la composition peut être très variable. Les plus courants sont les tubes destinés aux hautes températures (en acier au manganèse-molybdène à faible vitesse de fluage) et les tubes destinés aux industries chimiques et du pétrole (en acier au chrome-molybdène, avec addition de vanadium ou de nickel). Pour les tuyauteries devant résister aux actions oxydantes, on utilise les aciers inoxydables du type 18/8, à 18 % de chrome et 8 % de nickel, avec ou sans addition de molybdène ou de titane.

1.1.4. Tuyaux en métaux ou en alliages non ferreux

1° *Tuyaux en cuivre*. — Ces tubes servent à de multiples usages, au premier rang desquels figure la distribution de l'eau et du gaz à l'intérieur des bâtiments. Les principaux avantages du tube en cuivre sont sa facilité de façonnage et de raccordement par soudure capillaire, sa bonne tenue au contact des matériaux de construction et sa perte de charge très réduite. Ces tuyaux sont généralement étirés à froid par laminage d'un lingot creux entre les rouleaux d'un laminoir conique. Suivant leur utilisation, les tuyaux en cuivre sont livrés en longueurs droites de 4,50 m (tubes écrouis) ou en couronnes de 20 m (tubes recuits). Leurs diamètres (norme NF A 68-201) vont de 3 à 200 mm et leurs épaisseurs de 0,5 à 12 mm.

2° *Tuyaux en alliages de cuivre*. — Ils se présentent sous la même forme que les tuyaux en cuivre mais se travaillent plus difficilement. Ils sont principalement employés dans les échangeurs de chaleur (condensateurs, réchauffeurs). Les alliages utilisés sont le laiton dit « Amirauté » (UZ 29 E 1), le laiton à l'aluminium (UZ 22 A 2) et les laitons binaires (type UZ 30). Pour les installations sanitaires, on utilise surtout le laiton (UZ 40).

3° *Tuyaux en plomb*. — Ils étaient particulièrement utilisés dans le bâtiment pour les canalisations d'eau, de gaz et d'évacuation d'eaux usées, en raison de la résistance du plomb à la corrosion et de sa facilité d'emploi. Leur prix les fait maintenant réserver pour le transport des produits liquides corrosifs dans l'industrie chimique. Ils sont obtenus à chaud par filage à la presse et sont livrés en couronnes. Les diamètres intérieurs varient de 10 à 50 mm et les épaisseurs de 2 à 10 mm suivant le diamètre et la pression d'emploi (jusqu'à 10 bars).

4° *Tuyaux en alliages de nickel*. — En dehors de son utilisation à l'état pur, le nickel est essentiellement utilisé pour la fabrication d'alliages résistant à la corrosion, tels que le monel (67 % Ni, 30 % Cu et diverses additions), l'inconel (80 % Ni, 6 % Fe et 14 % Cr) et les cupronickels (20 à 30 % de Ni et 70 à 80 % de Cu).

5° *Tuyaux en métaux légers*. — Leur emploi s'est considérablement accru depuis quelques années pour le transport des fluides. On utilise principalement l'aluminium pur (A 5 et A 9), le duralium (A-U 4 G), les alliages aluminium-magnésium (A-G 3 et A-G 5) et le magnésium pur.

1.1.5. Tuyaux en béton. — Les tuyaux métalliques enterrés présentent l'inconvénient d'être attaqués par l'action des composés magnésiens et des sulfates contenus dans le sol. Les courants telluriques vagabonds circulant dans le sol sont également une cause de corrosion. La mise au point de la construction de tuyauteries à base de ciment, destinées à remédier à ces inconvénients, a donné naissance à diverses catégories de canalisations :

1° *Tuyaux en amiante-ciment*. — Fabriqués par enroulement d'une pellicule de ciment armé d'amiante sur un noyau cylindrique, ils peuvent aussi comporter une armature métallique. Ces tuyaux sont très résistants : les limites actuelles de la pression de service sont de 25 bars pour un diamètre de 175 mm et de 15 bars pour un diamètre de 500 mm.

2° *Tuyaux en béton armé*. — Ils sont réservés aux conduites d'un diamètre supérieur à 250 mm. Ils peuvent être réalisés de diverses manières (tuyaux Bonna) :

— *Tuyaux en béton armé centrifugé et compacté :* l'armature est constituée d'un fil d'acier enroulé en hélice sur lequel sont soudés des fils rectilignes disposés suivant les génératrices du tube. Les diamètres intérieurs varient de 300 à 1 600 mm et les épaisseurs de parois de 37 à 155 mm ; la longueur utile des éléments est voisine de 3 m. L'assainissement constitue leur principale utilisation.

— *Tuyaux en béton précontraint :* un tube en béton centrifugé est précontraint longitudinalement par des fils tendus en acier à haute résistance ; une frette formée d'un fil d'acier est ensuite enroulée hélicoïdalement sous forte tension autour du tube précédent et l'ensemble reçoit un revêtement protecteur en béton vibré.

— *Tuyaux en acier soudé avec double revêtement de béton armé :* un tube médian en tôle d'acier soudée terminé par les pièces de joint est revêtu intérieurement de béton centrifugé et extérieurement de béton armé et vibré. Les diamètres intérieurs sont de 250 à 3 200 mm, l'épaisseur de 50 à 260 mm et la longueur utile (en raison inverse du diamètre) de 3 à 5 m. Ces tuyaux sont utilisés

pour l'adduction d'eau, la distribution ou l'irrigation, qu'il s'agisse d'eau potable, d'eau industrielle ou d'eau usée.

— *Tuyaux en béton précontraint à tôle médiane :* un tube constitué par une tôle d'acier revêtue intérieurement de béton centrifugé et extérieurement de béton vibré est fretté par un fil d'acier à haute résistance enroulé hélicoïdalement sous forte tension. L'ensemble reçoit un revêtement protecteur en béton vibré.

1.1.6. Tuyaux en matières plastiques. — L'utilisation des matières plastiques dans la fabrication des tuyauteries connaît un essor considérable. Les raccordements doivent être particulièrement soignés car ils conditionnent la durée de vie de l'installation : il est préférable d'éviter les filetages de tubes qui sont amorces de rupture. La suspension du tuyau doit être réalisée avec des supports rapprochés, quelquefois continus.

1° *Tuyaux en polychlorure de vinyle (PCV) rigide.* — Utilisés pour l'eau, les produits chimiques et les liquides alimentaires jusqu'à 60° C, ils sont à proscrire pour les produits chlorés, les essences et les solvants. Les diamètres varient de 10 à 92,4 mm et l'épaisseur de 1 à 8,8 mm. La pression de service peut atteindre 10 bars.

2° *Tuyaux en PCV souple.* — Utilisés pour l'arrosage et les emplois usuels, ils sont renforcés éventuellement par un câble de nylon. Les diamètres varient de 13 à 20 mm, l'épaisseur est généralement de 2,5 mm et la pression maximale est de 5 bars.

3° *Tuyaux en polyéthylène.* — Très employés pour les adductions d'eau et pour les liquides alimentaires, ils sont très légers (densité 0,92) et utilisables de — 25 °C à + 65 °C. Il en existe trois séries correspondant à des pressions de fonctionnement de 4,6 et 10 bars. Les diamètres intérieurs variant de 10 à 76 mm ; les épaisseurs sont comprises entre 2 et 10,5 mm suivant le diamètre et la pression d'utilisation.

4° *Tuyaux en rilsan.* — Utilisables de — 40 °C à + 60 °C (ils tolèrent des pointes à 100 °C), ils présentent une bonne résistance aux bases, aux solvants non chlorés, aux produits pétroliers, aux acides organiques et à certains acides minéraux dilués. Leur coefficient de dilatation est important (12 fois celui de l'acier) et leur prix plus élevé que le PCV. Les diamètres extérieurs s'étagent de 7 à 140 mm.

1.1.7. Tuyaux en matériaux divers. — Quantité d'autres matières sont utilisées pour la réalisation de tuyauteries.

Le grès est très employé pour les canalisations souterraines d'évacuation d'eaux usées ; les joints sont réalisés au ciment et pour les tuyaux en grès anti-acides, au brai.

L'ébonite et le verre sont employés pour leur résistance aux produits chimiques. Le verre, utilisé aussi pour sa transparence (garnitures de niveau), est évidemment un matériau idéal vis-à-vis des agents corrosifs mais son inconvénient majeur est sa fragilité.

Le zinc est seulement employé pour la constitution de tuyaux, agrafés et soudés, destinés aux descentes d'eaux pluviales.

Le bois a été utilisé dans les pays nordiques pour des tuyauteries d'adduction d'eau enterrées et a donné de bons résultats.

1.2. Tuyaux souples

1.2.1. Tuyaux métalliques flexibles

1° *Tuyaux agrafés.* — Constitués par une hélice continue, en tôle profilée, dont chaque spire est agrafée avec un certain jeu sur la spire suivante, leur étanchéité est obtenue par un fil de caoutchouc ou d'amiante inséré



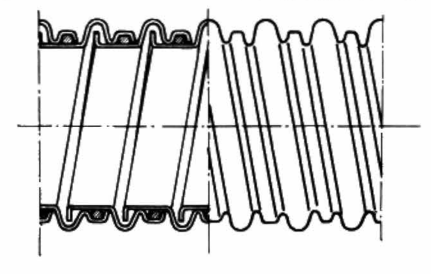


Fig. VIII-2

Tuyau flexible agrafé

entre deux spires (fig. VIII-2). Ces tuyaux peuvent servir pour les fluides depuis le vide (aspirateurs domestiques) jusqu'aux pressions moyennes. Dans ce dernier cas, leur résistance est augmentée par l'adjonction d'une spire extérieure en acier. Exécutés en acier, en cuivre, en laiton et en alliages légers, ils sont fabriqués jusqu'à des diamètres de 200 mm, dans une grande variété de types.

2° *Tuyaux sans joint.* — Leur flexibilité est obtenue par une série d'ondulations parallèles ou hélicoïdales (fig. VIII-3). Très résistants, ils peuvent être utilisés pour

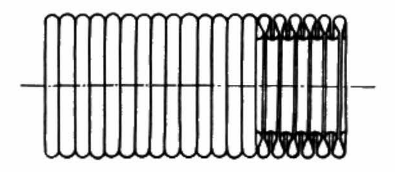


Fig. VIII-3

les hautes pressions avec adjonction de tresses métalliques extérieures. Réalisés en acier galvanisé, en acier inoxydable ou en tombac, ils sont exécutés jusqu'à des diamètres de 100 mm mais il faut noter que leur longueur est limitée (2 à 5 fois le diamètre).

1.2.2. Tuyaux en caoutchouc. — Constitués par du caoutchouc leur résistance est notablement augmentée par l'insertion de toiles textiles ou métalliques noyées dans l'épaisseur. La qualité à trois toiles est l'une des plus courantes mais on trouve jusqu'à dix toiles dans les tuyaux destinés à de hautes pressions. Leur résistance peut être également améliorée par une hélice en fil métallique entourant le tuyau, ou conjuguée avec une autre hélice intérieure.

1.2.3. Tuyaux en toile. — Ces tuyaux sont utilisés par les services d'incendie, étant donné leur faible poids et leur facilité d'enroulement. Un entretien périodique est nécessaire pour les maintenir en bon état et conserver leur étanchéité.

1.3. Assemblage des tuyaux et joints

1.3.1. Assemblages fixes. — Les modes d'assemblage des tuyauteries sont extrêmement variés. Ils sont fonction de la nature du matériau constituant le tuyau et des nécessités de montage ou de démontage.

1° *Assemblage par soudage.* — C'est le plus répandu des modes d'assemblage non démontable. Particulièrement économique, il conserve toutes ses qualités dans le temps, tout en permettant de fortes pressions d'utilisation. Pour les tubes en acier, la jonction sera faite par soudage autogène ou électrique. Le joint soudé en V (fig. VIII-4), le plus courant et le plus simple, est réalisé après chanfreinage à 45° des deux extrémités à joindre. À condition qu'elle soit

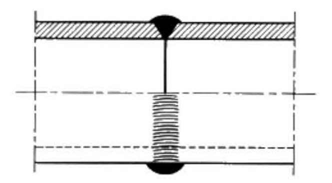


Fig. VIII-4

Joint soudé en V

exécutée jusqu'au fond, cette soudure répond à toutes les exigences. Dans le cas de tubes de très forte épaisseur, il est nécessaire d'exécuter un joint en forme de tulipe exécuté en plusieurs passes (fig. VIII-5). Si l'on veut éviter

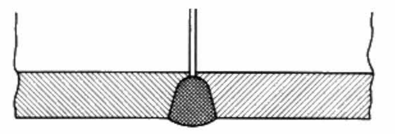


Fig. VIII-5

la formation de gouttes de soudure à l'intérieur du tuyau, une bague devra être insérée entre les deux extrémités à joindre, préalablement élargies (fig. VIII-6).

Le soudage autogène est également employé pour la jonction des tubes en acier inoxydable, en nickel, en monel et en alliages légers.

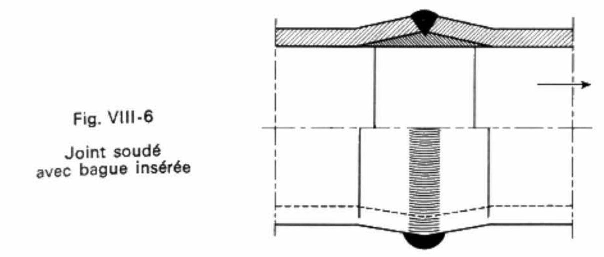
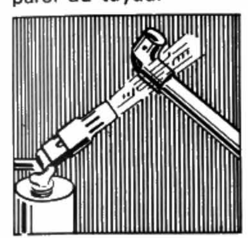


Fig. VIII-6

Joint soudé avec bague insérée

Pour le plomb, on utilise une soudure à 30 % d'étain effectuée sur l'assemblage, formé par un bout du tuyau à souder emboîté dans une tulipe formée au préalable sur l'autre extrémité. Pour résister aux produits chimiques, seul le soudage autogène est utilisable. Pour les tuyaux en cuivre, on utilise une soudure à l'étain, soit après avoir préparé les extrémités comme pour le plomb, ce qui est long, soit en reliant les tuyaux par des raccords à souder en cuivre ou en bronze. Le jeu, très précis, ménagé entre l'alésage du raccord et le tube permet à la soudure à l'étain de se répartir uniformément et instantanément par capillarité, quelle que soit la position du raccord (fig. VIII-7). Très rapide à réaliser, cet assemblage à raccords soudés par capillarité donne toute garantie d'étanchéité, jusqu'à des pressions très élevées. On emploie aussi le soudage autogène pour assembler des tuyaux métalliques flexibles sans joint, soit entre eux, soit sur des brides ou des pièces qui comportent un collet de même épaisseur que la paroi du tuyau.



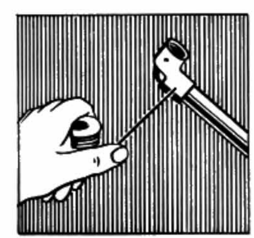


Fig. VIII-7 — Pose d'un raccord à souder par capillarité sur tube cuivre ; 1° chauffage ; 2° soudure

2° *Assemblage par rivetage.* — Ce type d'assemblage n'est utilisable que dans les tuyauteries en tôle de grand diamètre. Il ne donne que des garanties incertaines quant à l'étanchéité et n'est presque plus employé.

3° *Assemblage par emboîtement ou manchons.* — Il est utilisé à peu près uniquement pour les installations souterraines.

Pour les tuyaux en fonte, chaque tuyau (fig. VIII-8) se termine par une partie évasée comportant une rainure intérieure. L'extrémité mâle peut comporter ou non un collet destiné à servir de butée de garniture. L'étanchéité s'obtient en bourrant préalablement le fond du logement avec de la filasse sur laquelle on coule du plomb ou une matière similaire.

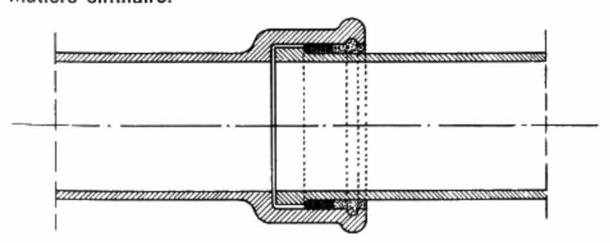


Fig. VIII-8 — Tuyau en fonte à emboîtement et cordon

Pour les tubes en acier, l'assemblage est analogue (fig. VIII-9) avec, si nécessaire, la protection de la partie mise à nu par une couche d'asphalte plastique enveloppée d'une bande de jute. Pour les tuyaux en amiante-ciment, la forme du manchon est la même que pour la fonte ; on y coule du ciment.

1.3.2. Assemblages démontables

1° *Assemblages spéciaux pour tuyaux fonte.* — La nécessité d'améliorer la rapidité et la facilité de montage,

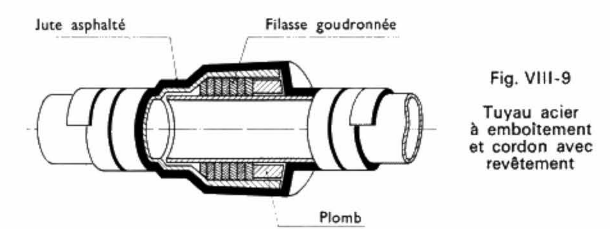


Fig. VIII-9

Tuyau acier à emboîtement et cordon avec revêtement

tout en laissant au joint une certaine flexibilité de façon à pouvoir se prêter éventuellement à des mouvements de terrain, a donné naissance à divers systèmes de jonction où l'étanchéité est obtenue par la compression dans un logement d'une rondelle d'étanchéité en caoutchouc.

— *Joint Gibault* (fig. VIII-10) : il permet l'utilisation de tubes lisses, l'étanchéité étant obtenue par l'écrasement de deux rondelles en caoutchouc de section rectangulaire entre une bague centrale biconique et deux contre-brides serrées par boulons. Cet assemblage est très flexible et permet la dilatation des tuyaux.

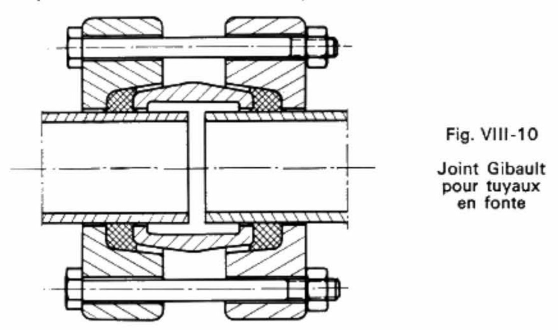


Fig. VIII-10

Joint Gibault pour tuyaux en fonte

— *Joint Express* (fig. VIII-11) : l'étanchéité est obtenue par la compression d'une bague en caoutchouc serrée par une contre-bride dans un logement du manchon usiné spécialement.

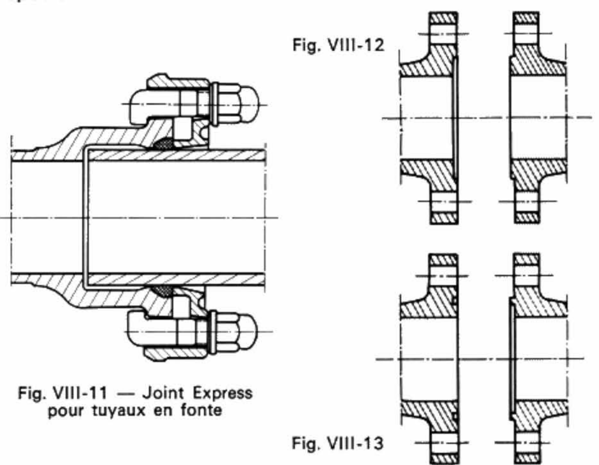


Fig. VIII-11 — Joint Express pour tuyaux en fonte

Fig. VIII-12

Fig. VIII-13

2° *Assemblage des tuyaux par brides.* — Les assemblages par brides sont les plus utilisés ; ce sont aussi les plus sûrs et les plus étanches. Ils comportent un joint annulaire plat serré entre les deux brides.

Le diamètre extérieur des brides, le diamètre de perçage, le nombre et le diamètre des boulons sont fixés par les normes en fonction de la pression d'utilisation. Le nombre de boulons est toujours un multiple de 4 et aucun trou ne doit se trouver dans le plan de symétrie horizontal ou vertical. Seules font exception à cette règle les brides destinées aux tuyauteries souterraines en fonte qui sont réalisées suivant un gabarit dit « Ville de Paris ».

La face de serrage des brides peut être plane, à emboîtement simple (fig. VIII-12) ou à emboîtement double (fig. VIII-13). Ces deux derniers types donnent une plus grande sécurité car ils évitent un éclatement du joint par la pression du fluide en cas de serrage insuffisant ; ils assurent aussi un centrage des deux brides et du joint.

Les brides peuvent être raccordées au tuyau par vissage (fig. VIII-14) ou être tournantes sur un collet battu (fig. VIII-15) réalisé par déformation de l'extrémité du tube. Les brides mandrinées (fig. VIII-16) possèdent une série de gorges intérieures dans lesquelles le métal du tuyau est refoulé par dudgeonnage ; autrefois très utilisées, elles sont maintenant remplacées par des brides soudées.

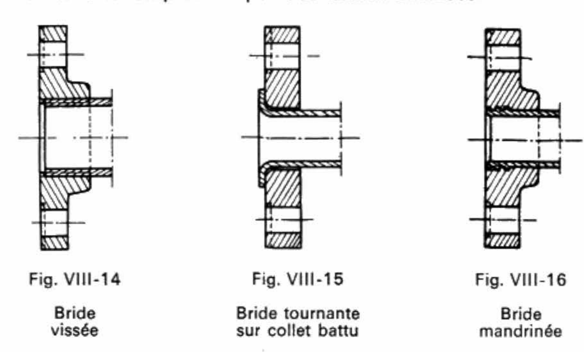


Fig. VIII-14 — Bride vissée

Fig. VIII-15 — Bride tournante sur collet battu

Fig. VIII-16 — Bride mandrinée

Le soudage pour les basses pressions peut s'effectuer sur une bride plate (fig. VIII-17) ou sur une bride à collerette (fig. VIII-18) dont l'extrémité à souder est de même épaisseur que le tube, ce qui facilite le soudage et donne le maximum de garantie d'étanchéité.

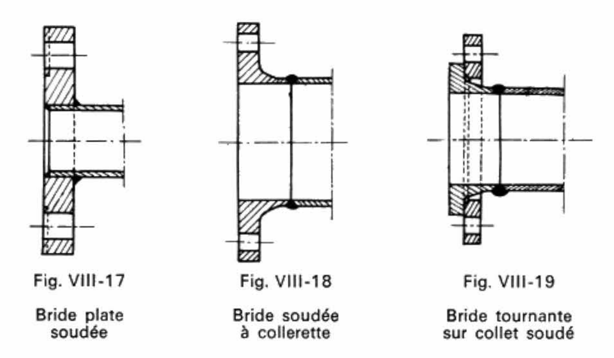


Fig. VIII-17 — Bride plate soudée

Fig. VIII-18 — Bride soudée à collerette

Fig. VIII-19 — Bride tournante sur collet soudé

L'assemblage des tuyauteries pour les hautes pressions et pour les températures élevées se fait par bride tournante sur collet soudé (fig. VIII-19). Ce mode de jonction permet de réduire au minimum les tensions supplémentaires imposées aux boulons, d'une part par les différences de dilatation dues aux écarts de température entre les brides (chaudes) et les boulons (froids), d'autre part, par l'écartement des brides sous l'action de la pression (desserrage élastique du joint).

Le serrage des brides destinées à des températures inférieures à 250 °C peut être réalisé avec des boulons en acier non allié ; pour des températures supérieures, il est nécessaire de recourir à des tiges filetées en acier spécial au chrome molybdène.

3° *Assemblage des tuyaux par filetage.* — Ce mode d'assemblage est destiné aux tuyauteries dont le diamètre extérieur n'excède pas 114,3 mm. Il doit être réalisé sur les tubes en acier dits tubes « gaz », dont l'épaisseur est suffisante pour l'exécution du filetage. L'étanchéité est obtenue par le contact entre le filetage conique réalisé sur le tube et le taraudage cylindrique des pièces de raccordement. Pour assurer l'étanchéité et faciliter les démontages ultérieurs, avant d'opérer le vissage, on enroule quelques brins de filasse ou une pellicule de téflon autour du filetage conique enduit d'une pâte spéciale.

En France, le seul filetage normalisé est le filetage « gaz » (NF E 03-004 ; V. chap. 1). Les pays anglo-saxons utilisent parallèlement au filetage « gaz » un système d'assemblage par filetage conique sur taraudage conique, dénommé *Briggs* ou *Unified Standard Pipe* (*U.S.P.*).

L'industrie du pétrole utilise presque exclusivement un filetage spécial, normalisé par l'*American Petroleum Institute* (*A.P.I.*) ; filetage et taraudage sont coniques et le pas fin permet l'exécution du filetage sur les tubes lisses (V. § 1.1.3, 2°) plus minces que les tubes « gaz ».

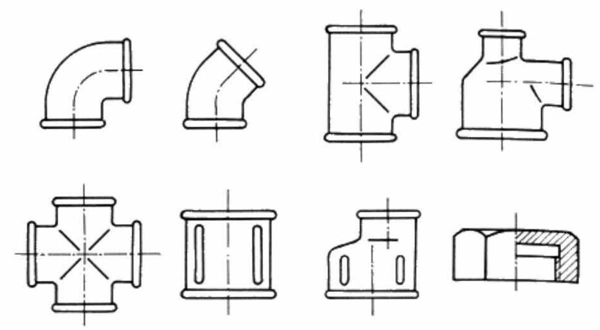


Fig. VIII-20 — Raccords en fonte malléable ; coude à 90° ; coude à 45° ; té ; té réduit ; croix ; manchon ; manchon de réduction excentré ; bouchon

Pour l'assemblage des tuyauteries, on utilise des pièces de raccordements appelées raccords et normalement exécutées en fonte malléable. En plus des manchons de jonction, il existe un nombre considérable de modèles destinés à réaliser toutes les combinaisons possibles (coudes, tés, manchons de réduction, croix, bouchons : fig. VIII-20). Pour les parties devant être démontées, on utilise des raccords-union (fig. VIII-21), dans lesquels l'étanchéité est obtenue entre deux surfaces planes ou coniques serrées par un écrou. On trouve également ces raccords exécutés en acier matricé et en bronze.

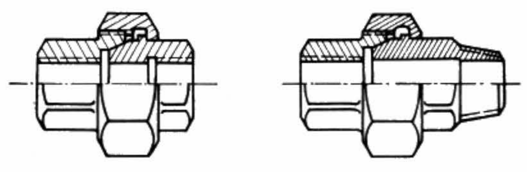


Fig. VIII-21 — Raccords-union femelle-femelle et mâle-femelle en fonte malléable à portée conique

4° *Assemblages rapides.* — Il existe de nombreux types de raccords rapides permettant de réaliser la jonction étanche de deux tuyauteries par une manœuvre simple. Les raccords « Express » (fig. VIII-22), destinés aux tuyauteries souples en caoutchouc pour l'air comprimé, sont verrouillés par une rotation de 45° (après engagement des tenons d'accrochage) et l'étanchéité est obtenue par des joints à lèvres, en caoutchouc, serrés par la pression.

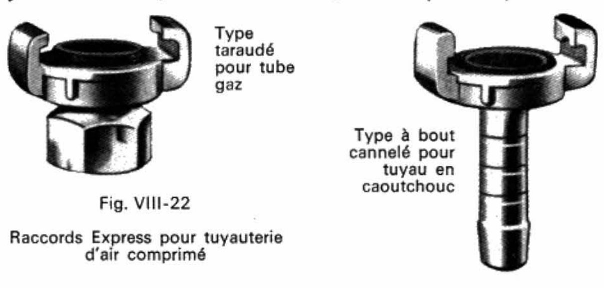


Fig. VIII-22

Raccords Express pour tuyauterie d'air comprimé

L'étanchéité s'obtient de façon similaire dans les raccords symétriques Guillemin (fig. VIII-23), le serrage initial des joints étant obtenu par la rotation d'une bague portant une rampe. Ces derniers raccords sont utilisés pour les tuyaux souples de matériel d'incendie et de manutention de liquides.



Fig. VIII-23

5° *Assemblage à bague ou à collet.* — Dans les raccords à bagues biconiques (fig. VIII-24 et 25), l'étan-

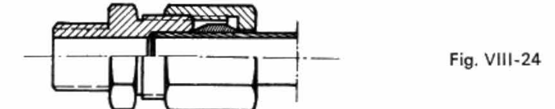


Fig. VIII-24

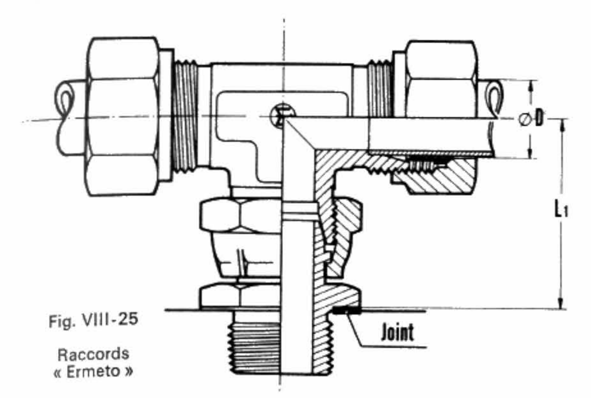


Fig. VIII-25

Raccords « Ermeto »

chéité est obtenue par le sertissage d'une bague biconique, enfilée sur le tuyau, sous l'action de deux cônes de serrage. L'étanchéité est très bonne. Ces raccords peuvent s'appliquer à tous les tuyaux, à condition que la surface extérieure soit suffisamment lisse.

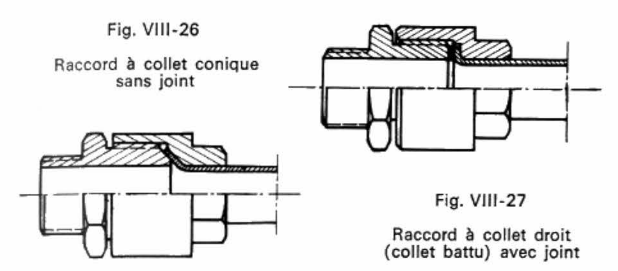


Fig. VIII-26

Raccord à collet conique sans joint

Fig. VIII-27

Raccord à collet droit (collet battu) avec joint

Les raccords à collet conique (fig. VIII-26), utilisés surtout dans l'industrie frigorifique ou pour les hydrocarbures et ceux à collet droit avec joint (fig. VIII-27), employés en tuyauterie sanitaire, s'utilisent pour la jonction des tuyauteries en cuivre après déformation de l'extrémité.

Le raccord « Kanax » (fig. VIII-28) en laiton, à blocage sur cannelures, est utilisé pour la jonction des tuyaux en matières plastiques souples ou semi-rigides. Le raccord

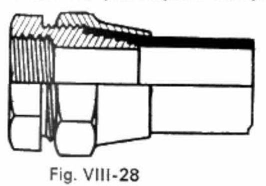


Fig. VIII-28

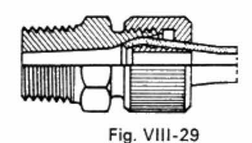


Fig. VIII-29

« Kanéril » en rilsan (fig. VIII-29) convient pour les produits chimiques et les solvants. Pour les tuyaux souples en caoutchouc, on utilise des raccords ayant un bout cannelé emmanché dans le tuyau qui est serré par un collier (V. fig. VIII-22). Pour les tuyaux haute pression à toile métallique on emploie un bout conique et le serrage est assuré par une bague cannelée (raccord Ermeto, fig. VIII-30).

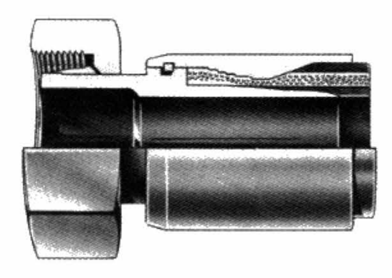


Fig. VIII-30 — Raccord Ermeto pour tuyau souple en caoutchouc à toile métallique

6° *Assemblage des tuyaux métalliques flexibles.* — L'assemblage se fait par un simple soudage de l'extrémité du tuyau dans l'orifice non fileté d'un raccord (fig. VIII-31). On emploie aussi des raccords-union qui se fixent sur le tuyau par vissage, la partie dépassante des spires étant écrasée pour former un plan de joint correct.

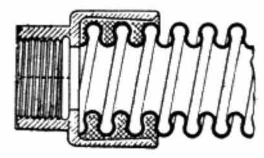


Fig. VIII-31

Raccord soudé pour tuyau flexible

1.3.3. Éléments de tuyauterie. — Le prix de revient élevé et la difficulté de réalisation des formes courbes et des branchements exécutés en chantier sur les tuyauteries ont amené la création d'éléments standard dont les principaux types sont les coudes, les tés, les croix, les réductions et les bouchons. Ils peuvent être à brides et sont alors réalisés en fonte ou en acier moulé (fig. VIII-32 et 33).



Fig. VIII-32

Croix à brides en acier moulé

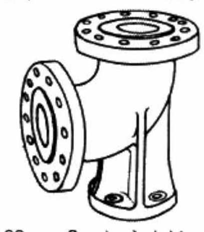


Fig. VIII-33 — Coude à brides en acier moulé avec pied support

Les éléments à souder sont fabriqués à partir du tuyau en acier étiré sans soudure et le raccordement aux parties droites se fait par soudage autogène ou électrique (fig. VIII-34 et 35).

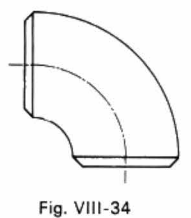


Fig. VIII-34

Coude à souder en acier étiré

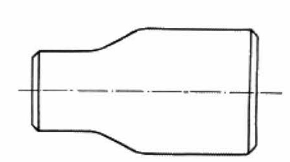


Fig. VIII-35 — Réduction à souder en acier étiré

La dilatation importante des métaux sous l'action de la température nécessite un examen soigneux du tracé des tuyauteries. Une élévation de température de 300 °C, par exemple, se traduit par un allongement de tuyauterie de 3 mm par mètre; une tuyauterie de 50 mètres s'allonge donc de 150 mm. Si son tracé et le choix des points d'appui ne lui permettent pas de se dilater librement, il faut alors utiliser des compensateurs de dilatation. Les lyres de dilatation (fig. VIII-36) peuvent être réalisées en tuyau lisse, en tuyau plissé ou en tuyau ondulé. La formation de plis procure l'avantage d'une grande élasticité mais si les sollicitations du métal sont importantes (pression élevée), il faut utiliser le tube lisse avec le plus grand rayon de cintrage possible.

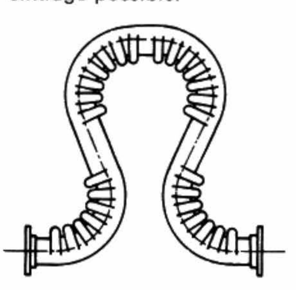


Fig. VIII-36 — Lyre de dilatation en tube d'acier plissé

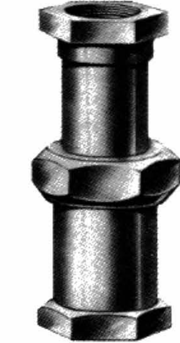


Fig. VIII-37 — Joint de dilatation à presse-étoupe, en bronze, taraudé

Les joints de dilatation (fig. VIII-37) comportent deux parties coulissant l'une dans l'autre, l'étanchéité étant obtenue à l'aide d'une garniture en tresse d'amiante graphitée, comprimée par un fouloir. Ce type de joint est moins

encombrant que la lyre mais il n'absorbe que des dilatations plus faibles et offre un risque de fuite.

Les soufflets de dilatation (fig. VIII-38) sont constitués par un tuyau métallique flexible muni de deux brides de raccordement; ils sont généralement employés pour les conduites de vapeur, la pression maximale admissible varie de 12 à 32 bars suivant les dimensions et la température d'utilisation. Pour les produits corrosifs, ces soufflets peuvent être réalisés en téflon.

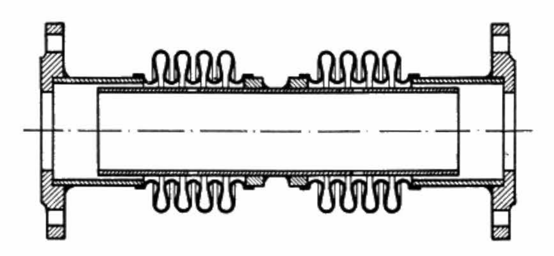


Fig. VIII-38 — Soufflet compensateur IWK en acier, à brides

1.3.4. Joints d'étanchéité statiques. — Pour assurer l'étanchéité entre les faces des brides, la solution idéale est l'assemblage sans interposition de joint: l'étanchéité est alors obtenue métal contre métal avec glaçage des portées de contact au centième de millimètre. Cette solution ne peut être adoptée que dans les installations à très haute pression, la réalisation de ces portées étant longue, délicate et onéreuse.

Il est donc nécessaire, dans la plupart des cas, d'intercaler un matériau élastique qui sera soumis à une pression de contact nettement supérieure à la pression à étancher mais ne dépassant pas sa limite d'élasticité. Dans tous les cas, un joint mince offrira une meilleure résistance qu'un joint épais.

1° *Mastics.* — Ils sont surtout destinés à obtenir l'étanchéité des joints filetés avec ou sans interposition de filasse. En plus de la céruse, on utilise de nombreux mastics composés de céruse, d'huile de lin et de minium. Le mastic de fer est surtout utilisé pour obturer des fuites.

2° *Joints en cuir.* — Employés presque uniquement pour les tuyauteries d'eau, ils ne sont utilisés que pour les joints de petites dimensions et les faibles pressions.

3° *Joints en amiante et caoutchouc.* — Ce sont les plus courants. Leur composition diffère suivant les utilisations possibles (eau, vapeur, air, hydrocarbures ou produits chimiques). Dans certains cas, ils sont renforcés par un treillis métallique noyé dans l'épaisseur.

4° *Joints en amiante.* — L'amiante offre une très bonne résistance à la chaleur mais se délite facilement et il faut l'employer enrobée dans un matériau à faible limite élastique. Les joints métalloplastiques sont constitués par un enrobage en cuivre, en fer pur, en acier inoxydable ou en cupro-nickel entourant partiellement (joint ouvert) ou totalement (joint fermé) une âme en amiante (fig. VIII-39).





Fig. VIII-39
Joints métallo-plastiques type ouvert et type fermé

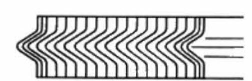


Fig. VIII-40 — Joint type « Spirflex » (*Joint Français*)

D'autres joints sont constitués par des spires alternées d'acier inoxydable et de bourrage à base d'amiante (fig. VIII-40).

5° *Joints en caoutchouc.* — Du fait de son élasticité, le caoutchouc peut aisément s'adapter sur toutes les imperfections des portées de contact sous une faible charge de serrage. Il est utilisé pour les fluides dont la température ne dépasse pas 100 °C. Ces joints sont des joints annulaires plats en basse pression et des joints moulés de formes diverses en haute pression: bague torique (fig. VIII-41) ou joint à lèvre (fig. VIII-42).

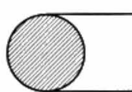


Fig. VIII-41
Bague torique

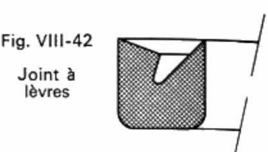


Fig. VIII-42
Joint à lèvres

6° *Joints en matières plastiques.* — De nombreux produits sont utilisés pour la fabrication des joints en fonction des conditions demandées. Le téflon, par sa résistance aux produits corrosifs et sa tenue à la température (260 °C) est particulièrement employé, le seul inconvénient étant son fluage qui impose de l'utiliser dans des emboîtements bien ajustés.

7° *Joints métalliques.* — Le choix du métal est fonction des conditions de température, de pression et de corrosion. On emploie des métaux à faible limite élastique (plomb, cuivre, aluminium, monel, nickel, aciers inoxydables ou fer pur). Les formes peuvent être variées, allant du joint annulaire plat au joint à faces striées complètement usinées (fig. VIII-43).

Fig. VIII-43
Joint métallique usiné

8° *Joints en produits divers.* — Des matériaux très divers sont utilisés en fonction des nécessités de construction ou d'utilisation (coton avec gommage naturel ou synthétique, feutre, papier, carton bakélisé, liège).

1.3.5. Joints d'étanchéité dynamiques. — Ils sont destinés à assurer l'étanchéité des parties coulissantes (joints de dilatation). Le montage classique est celui du presse-étoupe: dans une cavité annulaire, un bourrage est comprimé par un fouloir. Ce bourrage est composé de tresses ou de bagues en matériau pour joint (cuir, amiante-caoutchouc, amiante graphitée, caoutchouc ou téflon).

1.4. Particularités d'installation des tuyauteries

1.4.1. Teintes conventionnelles. — Les teintes à adopter pour la différenciation des tuyauteries sont normalisées (NF E 04-054). Une teinte fondamentale indique le fluide transporté et des anneaux colorés précisent l'état du fluide ou, dans certains cas, sa nature.

Teintes fondamentales	Teintes des anneaux de qualité
Rouge : .... Vapeur	Orange .... Chaud
Bleu .... Eau	Violet .... Froid
Noir ...... Eau de mer	Brun .... Pollué
Violet ... Hydrocarbures	Blanc .... Refoulé
Vert .... Air	Rouge ... Sous pression
Gris .... Gaz divers	Bleu clair ...... Raréfié
Rose .... Acides	Rose .... Liquéfié
Lilas .... Bases	
Jaune ...... Lubrifiant	

1.4.2. Détermination des dimensions. — Le débit étant fixé, le diamètre intérieur d'une tuyauterie se détermine en fonction des pertes de charge admissibles entre la source et le point d'utilisation. On peut employer les formules de pertes de charge dans les tuyauteries cylindriques (V. t. 3, Mécanique des fluides, chap. 5, § 2) ou les nombreuses abaques qui en dérivent (Colebrook, Lebeau, Oniga). En première analyse, on peut adopter une vitesse de circulation dans la gamme des valeurs suivantes:

— liquides .... 0,5 à 3 m/s
— vapeur d'échappement .... 15 à 25 m/s
— vapeur saturée .... 40 à 50 m/s
— vapeur surchauffée .... 60 à 80 m/s

L'épaisseur à donner aux tuyaux est calculée en fonction de la pression (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 3, § 5 et 6). Comme valeur de la contrainte admissible R_{pt},

on adopte, généralement, les valeurs suivantes en décanewtons par millimètre carré :

— acier inoxydable 18/8 15
— acier doux 12
— cuivre recuit 3
— cuivre écroui 12
— fonte 2
— plomb 0,2

Pour les tuyauteries à haute température, il y a lieu d'adopter un large coefficient de sécurité tenant compte de la vitesse de fluage du matériau à la température de service.

1.4.3. Tracé des conduites et supports

1° *Tracé.* — Il dépend essentiellement des circuits à réaliser et des appareils à desservir. Dans les tuyauteries en acier, il faut utiliser au maximum les soudures autogènes et éviter les brides. Dans les installations en tubes filetés, des raccords-union sont prévus pour assurer le démontage. Les tuyauteries destinées aux fluides chauds doivent comporter des compensateurs de dilatation ; à longueur égale, un tracé sinueux sera, dans ce cas, préférable car il permet de répartir les allongements sur de nombreux coudes et d'éviter les compensateurs. Dans les tuyauteries de vapeur et d'air comprimé, pour drainer les condensations, on donne aux tuyaux une pente de 3 mm/m, l'écoulement d'eau se faisant dans le même sens que la circulation principale. Ces condensations se rassemblent à des points bas munis de purgeurs. En aucun cas l'eau ne doit pouvoir séjourner dans ces points bas et obstruer la conduite : sous l'impulsion du fluide le bouchon d'eau ainsi formé pourrait provoquer la rupture de la tuyauterie.

2° *Supports.* — Les tuyauteries sont soumises à des sollicitations d'origines diverses telles que poids propre, poids du fluide, dilatation, pression, actions dynamiques du fluide dans les coudes ou poussée du vent. Il est nécessaire d'en tenir compte pour établir leurs fixations. Les tuyauteries pour fluides froids sont fixées aux parois à l'aide de colliers à vis ou à scellement (fig. VIII-44) ou supportées par des consoles ou des supports spéciaux. Les




Fig. VIII-44
Collier en acier galvanisé avec patte de scellement et vis à bois

tuyauteries pour fluides chauds sont soutenues par des supports permettant le libre déplacement du tube sous l'action de la dilatation. Ces supports sont à platine, à rouleaux ou à billes, si la tuyauterie repose dessus. Ce sont des supports articulés avec ressort de compensation si le tuyau est suspendu.

1.4.4. Calorifugeage. — Dans le cas de transport de fluides chauds, la déperdition calorifique des tuyauteries entraînerait une perte importante d'énergie, si on ne la limitait pas par un calorifugeage. Celui-ci est réalisé en enrobant le tuyau dans une matière mauvaise conductrice de la chaleur : liège aggloméré, amiante, laine de roche, laine de verre, kieselguhr ou plastiques expansés. Dans les installations à marche discontinue, le calorifugeage doit englober les brides et la robinetterie pour éviter les chocs thermiques sur les joints.

2. APPAREILS ACCESSOIRES DE TUYAUTERIES

2.1. Définition. — Intercalés dans une tuyauterie, les appareils accessoires de tuyauteries servent à modifier le débit ou à indiquer certaines caractéristiques du fluide (pression, débit, température, niveau). Ils ne comportent pas d'obturateur comme organe principal.

2.2. Séparateurs

1° *Séparateurs de liquides.* — Dans toute conduite de vapeur se trouve une certaine quantité d'eau produite par la condensation due au rayonnement de chaleur de la tuyauterie (ou par entraînement vésiculaire lors d'un débit de vapeur important). Il est nécessaire de débarrasser la conduite de cette eau qui pourrait s'accumuler dans les points bas et provoquer des coups d'eau dont les conséquences peuvent être extrêmement graves. Dans ce but, on intercale dans la conduite des séparateurs d'eau, où la séparation du fluide lourd et de l'eau est faite par centrifugation ou par choc. Dans les types courants, la séparation par choc s'effectue dans un chicanage et un orifice inférieur permet l'écoulement de l'eau condensée vers un purgeur d'extraction (fig. VIII-45). Un principe analogue est utilisé dans les séparateurs d'huile destinés à extraire l'huile entraînée dans les conduites d'air comprimé.

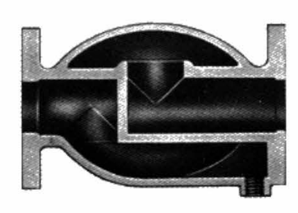


Fig. VIII-45
Séparateur d'eau, en fonte, à brides

2° *Séparateurs de solides.* — En plus des impuretés liquides, dans toutes les tuyauteries circulent des corps étrangers (rouille, débris de joints, tartre, calamine) qui risquent d'endommager les appareils utilisateurs ou les régulateurs et il est indispensable de placer un séparateur de sédiments en amont de ces appareils. Appelé également filtre à tamis (fig. VIII-46), cet appareil se compose d'un corps et d'un panier cylindrique en toile métallique ou en tôle perforée, destiné à retenir les impuretés solides. Un bouchon ou le chapeau (vissé ou boulonné) permet d'effectuer périodiquement le nettoyage.

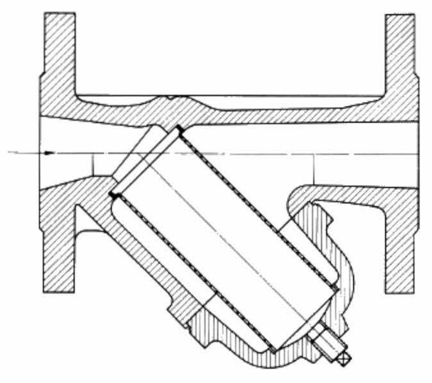


Fig. VIII-46
Filtre à tamis, en fonte, à brides

Pour éviter les entraînements de solides dans les tuyauteries d'aspiration, on utilise des crépines soit en tôle perforée (fig. VIII-47), soit en fonte (fig. VIII-48).

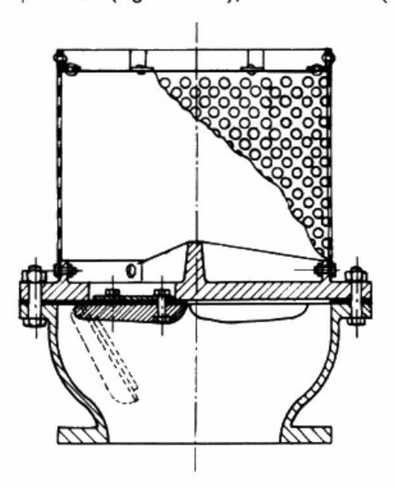
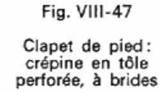



Fig. VIII-47
Clapet de pied : crépine en tôle perforée, à brides



Fig. VIII-48
Crépine taraudée en fonte

2.3. Purgeurs automatiques. — Les purgeurs automatiques ont pour but d'assurer l'extraction de l'eau de condensation dans les tuyauteries de vapeur, ou de l'air dans les tuyauteries d'eau.

1° *Purgeurs d'eau de condensation.* — Ces purgeurs doivent fonctionner sans défaillance, sous peine d'occasionner des pertes importantes de vapeur et il est indispensable de s'assurer régulièrement de leur bon fonctionnement. Parmi les très nombreux modèles de purgeurs qui ont été réalisés, on retiendra ceux dont le fonctionnement est le plus sûr :

— Le purgeur à flotteur ouvert (fig. VIII-49) se compose d'un corps en fonte contenant une cuve solidaire d'une tige pointeau ; lorsque l'eau condensée arrive dans le corps du purgeur, elle soulève ce flotteur et applique la tige pointeau sur son siège, assurant la fermeture du purgeur. Si l'afflux d'eau se poursuit, l'eau monte entre le flotteur et les parois et vient déborder dans le flotteur, qui, alourdi, descend et entraîne la tige pointeau, ouvrant l'orifice d'évacuation. Sous l'effet de la pression de la vapeur, l'eau est chassée par la tubulure centrale. Lorsque le flotteur est suffisamment allégé, il remonte et le cycle recommence. Un robinet de purge, placé à la partie supérieure, permet de purger l'air.

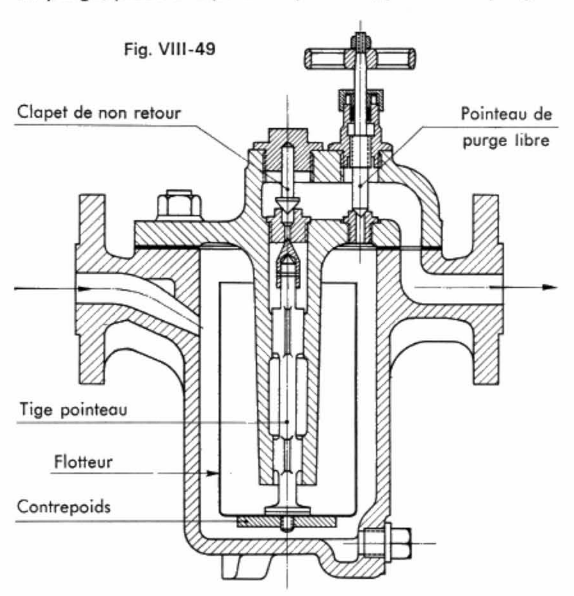


Fig. VIII-49

— Le purgeur à flotteur fermé (fig. VIII-50) comporte un flotteur généralement sphérique, forme qui permet une meilleure résistance à la pression. Ce flotteur, par l'intermédiaire d'un levier, commande l'ouverture ou la fermeture d'un obturateur. Primitivement réalisé sous la forme d'un clapet conique simple ou équilibré, cet obturateur est maintenant du type à tiroir dont le fonctionnement exige un effort réduit ; de plus, le déplacement du tiroir sur la glace permet de maintenir celle-ci constamment propre et sans dépôts. Un levier extérieur permet de manœuvrer le tiroir et de s'assurer du bon fonctionnement du purgeur. Un robinet, placé au point haut, est destiné à purger l'air.

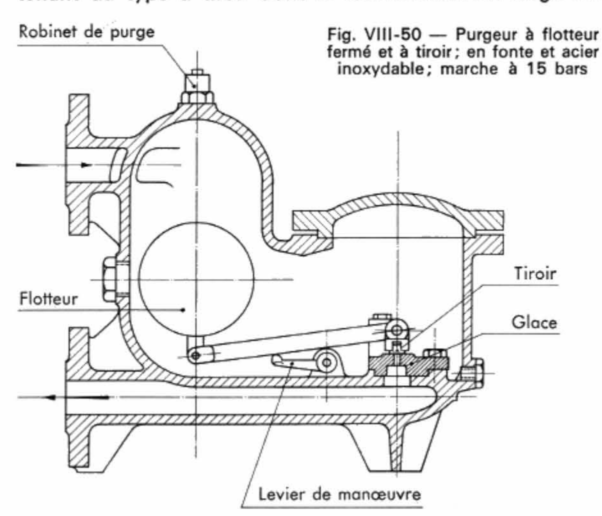
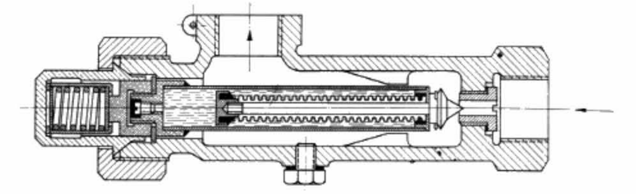
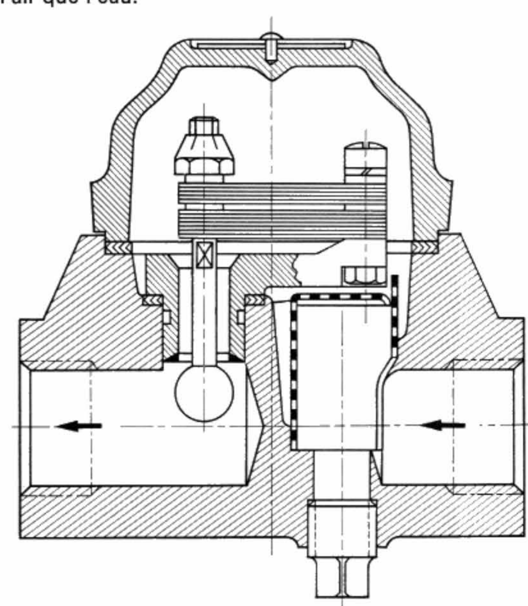


Fig. VIII-50 — Purgeur à flotteur fermé et à tiroir ; en fonte et acier inoxydable ; marche à 15 bars

— Le purgeur à dilatation (fig. VIII-51) comprend une cartouche métallique étanche contenant un liquide dilatable. Dès qu'il y a échappement de vapeur, la cartouche s'échauffe, le liquide se dilate et pousse le pointeau, obturant l'orifice de débit. On peut régler avec exactitude la température de fonctionnement du purgeur en modifiant l'enfoncement de la cartouche à l'intérieur du corps.


Fig. VIII-51 — Purgeur à dilatation taraudé en fonte ; marche à 10 bars

— Le purgeur à bilames est basé sur les propriétés des bilames. Une bilame est composée de deux métaux dont les coefficients de dilatation sont différents et qui ont été soudés par laminage. Quand la température augmente, la bilame s'incurve sous l'effet de la différence de dilatation de ses constituants. Le fonctionnement est comparable à celui du purgeur à dilatation. Le clapet est actionné par un empilage de bilames dont la force de traction s'oppose à l'action de la pression de la vapeur sur le siège (fig. VIII-52). Ce type de purgeur permet l'évacuation continue de grandes quantités d'eau, au départ, à froid. Il permet d'évacuer aussi bien l'air que l'eau.


Fig. VIII-52 — Purgeur à bilames (*Velan*)

2° *Purgeurs d'air.* — Ces appareils sont destinés à évacuer l'air qui s'accumule aux points hauts des canalisations de liquide et risque de gêner la circulation du fluide.

— Le purgeur d'air à flotteur, ou ventouse, (fig. VIII-53) comporte un clapet de fermeture directement lié au flotteur. L'air, en s'accumulant au point haut, chasse l'eau vers le bas ; le flotteur descend et ouvre l'orifice d'évacuation automatiquement fermé par la remontée du flotteur.

— Le purgeur d'air thermostatique, réalisé sur le même principe que le purgeur à dilatation, est destiné aux installations de chauffage central. Il ne peut fonctionner que sur une canalisation d'eau chaude : l'air emmagasiné autour de la cartouche permet son refroidissement, donc l'ouverture du clapet ; la purge d'air terminée, le contact de l'eau chaude provoque la fermeture de l'orifice.

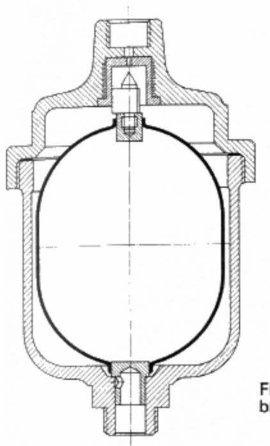


Fig. VIII-53 — Purgeur d'air en bronze à flotteur en acier inoxydable; marche 10 bars (*Comap-S.A.J.*)

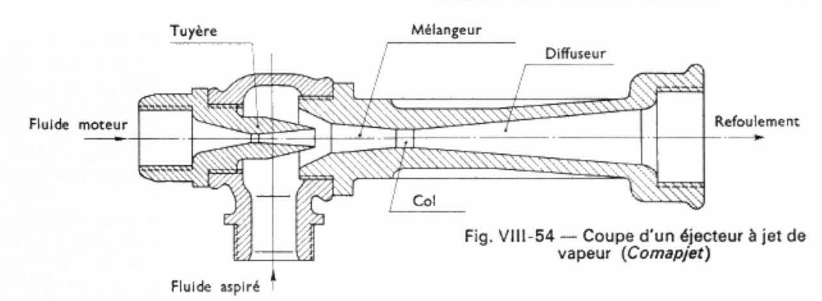


Fig. VIII-54 — Coupe d'un éjecteur à jet de vapeur (*Comapjet*)

2.4. Injecteurs. — Destinés à l'alimentation des chaudières, les injecteurs utilisent l'énergie cinétique d'un jet de vapeur pour refouler l'eau d'alimentation à une pression supérieure à celle régnant dans le générateur de vapeur. Ils sont peu utilisés.

2.5. Éjecteurs. — Les éjecteurs sont des appareils destinés à l'élévation ou à la compression des fluides, l'énergie nécessaire étant empruntée à un fluide différent ou de même nature pris à une pression supérieure.

Tous les éjecteurs présentent les mêmes éléments (fig. VIII-54) : une tuyère débitant le fluide moteur à grande vitesse, une partie convergente (ou mélangeur) dans laquelle le fluide moteur communique sa vitesse au fluide aspiré et une partie divergente (ou diffuseur) dans laquelle la vitesse est transformée en pression. En aucun cas, cette pression de refoulement n'est supérieure à la pression motrice : c'est la différence fondamentale entre éjecteurs et injecteurs. N'ayant aucun organe mobile, ils peuvent véhiculer des liquides fortement chargés de particules solides. Leur facilité d'installation, leur simplicité et leur entretien nul sont intéressants.

1° *Hydro-éjecteurs.* — Ils utilisent un liquide comme fluide moteur, pour aspirer un autre liquide. Une application particulière, l'hydro-éjecteur pour puits profond, permet d'aspirer l'eau à des profondeurs dépassant huit mètres, limite d'aspiration pratique des pompes.

2° *Éjecteurs à vide à jet d'eau et éjecto-condenseurs.* — Ils utilisent tous les deux l'eau comme fluide-moteur pour aspirer de l'air dans le premier cas, condenser de la vapeur dans le second. Ces deux appareils permettent d'atteindre des vides élevés, limités seulement par la tension de vapeur correspondant à la température de l'eau (par exemple, 18 mm de mercure pour de l'eau à 20 °C).

3° *Éjecteurs à vapeur.* — Utilisant la vapeur comme fluide-moteur, ils sont employés comme élévateur pour véhiculer des liquides, comme réchauffeur-barboteur pour réchauffer un liquide par injection de vapeur et comme compresseur pour aspirer un gaz. Dans cette dernière catégorie, le souffleur et les extracteurs d'air sont destinés à créer un vide (fig. VIII-55) ; leur consommation devenant prohibitive pour des taux de compression élevés, la compression totale est répartie entre plusieurs éjecteurs montés en série, la vapeur étant condensée entre chaque étage dans des condenseurs intermédiaires : on arrive ainsi à des vides de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres de mercure avec des volumes d'air aspirés importants. Pour de la vapeur, on emploie des thermocompresseurs quand la vapeur aspirée est sous une pression voisine de la pression atmosphérique (récupération des vapeurs perdues par l'évaporation) et des amplivides (fig. VIII-56) quand la vapeur est sous quelques millimètres de mercure (compression à une pression suffisante pour pouvoir la condenser généralement de 25 à 40 mm de mercure).

2.6. Appareils d'alarme sonores. — Ils sont destinés à avertir du fonctionnement anormal d'une installation, en provoquant automatiquement l'échappement d'un fluide sous pression, dans un appareil sonore (sifflet, trompe). Par exemple, le sifflet avertisseur de manque d'eau type Black se compose d'un sifflet monté sur un tuyau débouchant en dessous du niveau minimal de l'eau dans une chaudière. En cas d'oubli d'alimentation, la vapeur entre dans le tube, fait fondre un bouchon fusible et actionne le sifflet. D'autres systèmes, basés sur des commandes à flotteur, peuvent également signaler le manque ou le trop d'eau.

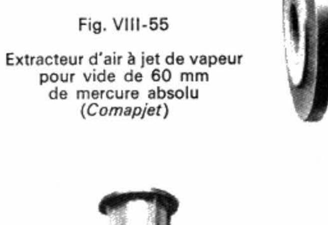


Fig. VIII-55

Extracteur d'air à jet de vapeur pour vide de 60 mm de mercure absolu (*Comapjet*)





Fig. VIII-56 — Amplivides destinés à la désodorisation d'huile sous vide poussé ; compression de vapeur de 5 à 40 mm de mercure absolu (*Comapjet*)

2.7. Indicateurs. — Les indicateurs sont destinés à faire connaître certaines caractéristiques des fluides. Il en existe de très nombreux types.

1° *Indicateurs de niveau* — Indiquant la position du niveau à l'intérieur d'un récipient, ce sont des organes de grande importance, surtout dans le cas des générateurs de vapeur.

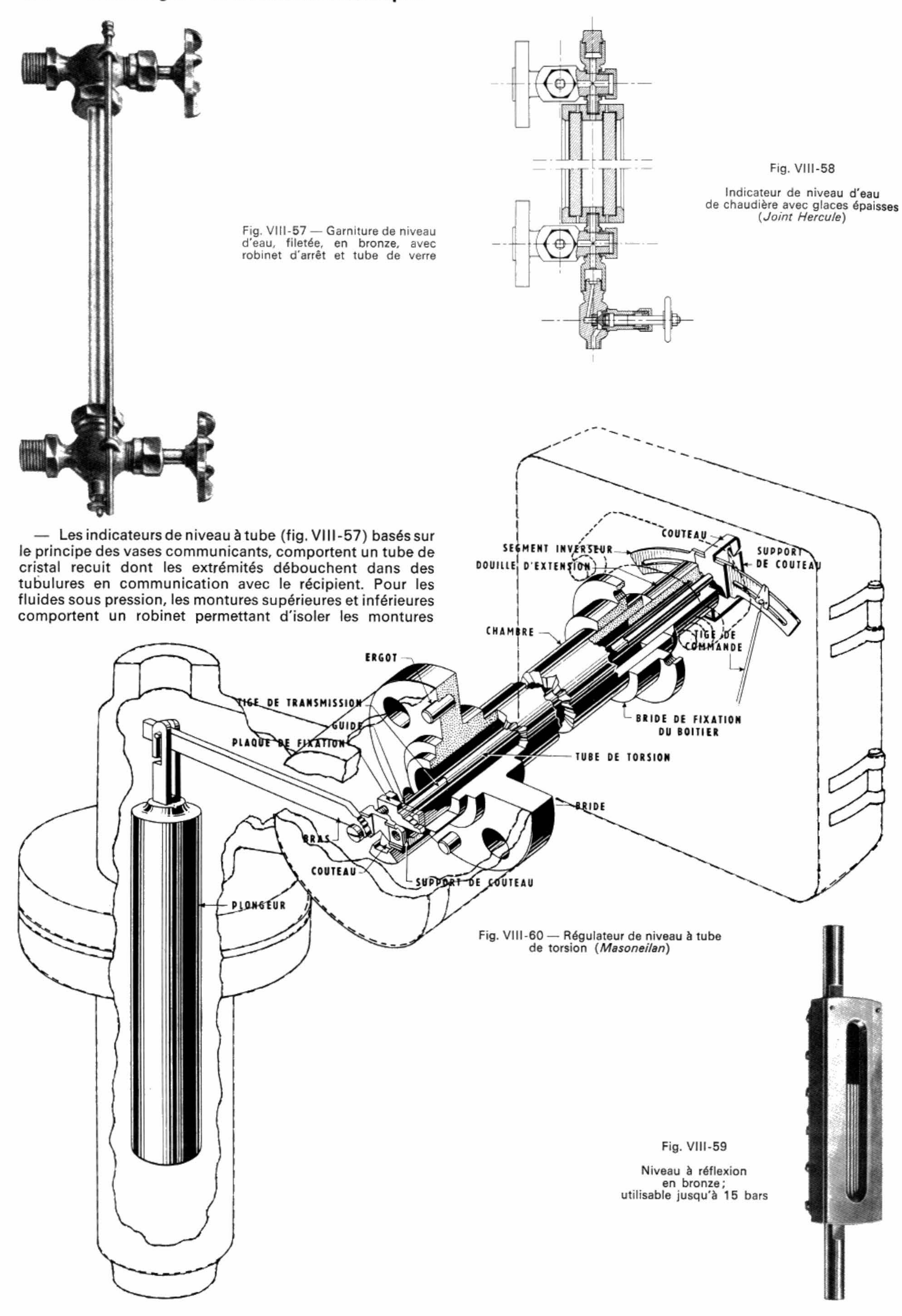


Fig. VIII-57 — Garniture de niveau d'eau, filetée, en bronze, avec robinet d'arrêt et tube de verre

Fig. VIII-58

Indicateur de niveau d'eau de chaudière avec glaces épaisses (*Joint Hercule*)

— Les indicateurs de niveau à tube (fig. VIII-57) basés sur le principe des vases communicants, comportent un tube de cristal recuit dont les extrémités débouchent dans des tubulures en communication avec le récipient. Pour les fluides sous pression, les montures supérieures et inférieures comportent un robinet permettant d'isoler les montures

Fig. VIII-60 — Régulateur de niveau à tube de torsion (*Masoneilan*)

Fig. VIII-59

Niveau à réflexion en bronze; utilisable jusqu'à 15 bars

pour le remplacement éventuel, en marche, du tube de niveau. À la partie inférieure, un robinet permet de vidanger; des bouchons situés sur les corps permettent le nettoyage. Par sécurité, une bille placée à l'intérieur de la monture fait office de clapet en cas d'un afflux brusque de fluide causé par le bris du tube. Sur les chaudières et les générateurs de vapeur, on préfère les indicateurs à glaces épaisses, moins fragiles (fig. VIII-58).

— Les indicateurs de niveau à réflexion (fig. VIII-59) se composent d'une glace en cristal prismatique fixée dans une monture métallique. La réflexion de la lumière sur la face intérieure striée de la glace fait que l'espace occupé par l'eau semble noir et que celui occupé par la vapeur est blanc argenté: le contraste des deux zones délimite nettement le niveau du liquide dans la chaudière. Ces glaces prismatiques peuvent être utilisées jusqu'à des pressions de 40 bars.

— Les indicateurs et les régulateurs de niveau à flotteur sont très employés. Un des modèles les plus perfectionnés est le régulateur de niveau à tube de torsion Masoneilan (fig. VIII-60). Un plongeur cylindrique en acier inoxydable reçoit la poussée du liquide dont on veut contrôler le niveau. La poussée du liquide sur ce plongeur varie en fonction du niveau et exerce sur l'extrémité libre d'un tube de torsion un couple proportionnel à la hauteur du liquide au-dessus du plongeur. Par l'intermédiaire d'une tige, la torsion du tube contrôle un mécanisme pneumatique qui pilote la commande d'une vanne de remplissage ou de décharge. L'avantage essentiel de ce dispositif est l'absence de frottement qui favorise la sensibilité et la fidélité.

— Les indicateurs de niveau pneumatique (fig. VIII-61) se composent d'une cloche à air placée au fond du réservoir, reliée par une canalisation à un manomètre enregistreur ou non. Une pompe à main ou un détendeur d'air comprimé alimente le circuit. Lorsque des bulles se dégagent par le bord inférieur de la cloche, le manomètre indique la hauteur du liquide.

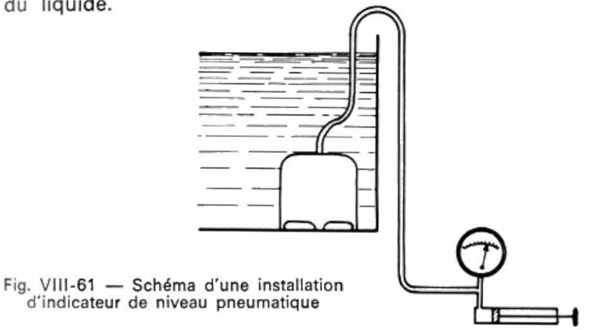


Fig. VIII-61 — Schéma d'une installation d'indicateur de niveau pneumatique

— Les indicateurs de niveau électrique utilisent un flotteur dont l'axe de rotation commande un potentiomètre électrique (fig. VIII-62). Un système différent consiste à utiliser le liquide à contrôler comme conducteur pour fermer une série de circuits, allumant des lampes témoins.

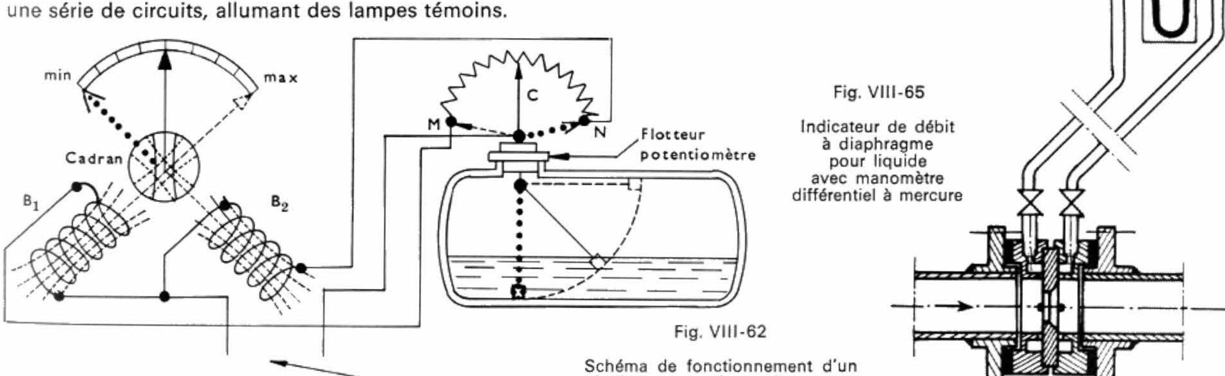


Fig. VIII-62

Schéma de fonctionnement d'un indicateur de niveau électrique

2° *Indicateurs de débit.* — L'un des plus simples, destiné à vérifier l'existence du débit d'une conduite (notamment à la sortie des purgeurs de vapeur), est le contrôleur de circulation à battant; il se compose d'un boîtier muni d'un regard en verre permettant d'apercevoir une palette qui s'incline sous l'action du courant (fig. VIII-63). Un perfectionnement consiste à remplacer la palette oscillante par une petite turbine en rilsan, ce qui permet de placer l'appareil dans n'importe quelle position.

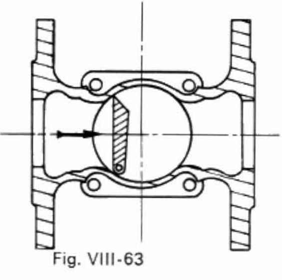


Fig. VIII-63

Contrôleur de circulation à battant

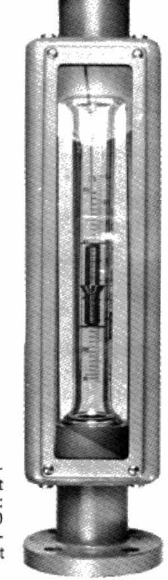


Fig. VIII-64 — Débitmètre à flotteur rotatif à armature en fonte et raccordement par brides; capacité: jusqu'à 30 m³/h d'eau et 900 m³/h d'air ramené dans les conditions normales de température et de pression (*Krohne*)

Les débits instantanés de fluides peuvent être mesurés à l'aide de rotamètres ou gyromètres (fig. VIII-64) dans lequel un mobile à ailettes, de poids et de forme appropriés, est mis en mouvement par le passage du fluide à contrôler dans un tube conique en verre, gradué. La hauteur de stationnement du mobile indique le débit du fluide. Les débitmètres (fig. VIII-65) sont basés sur la mesure des pressions à l'amont et à l'aval d'un diaphragme calibré, d'une tuyère ou d'un venturi. Ces appareils sont utilisés pour les gros débits.

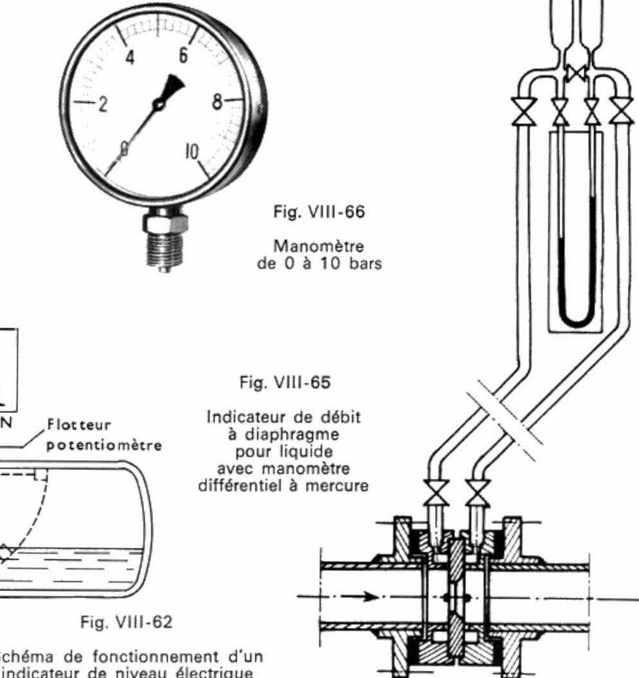


Fig. VIII-66

Manomètre de 0 à 10 bars

Fig. VIII-65

Indicateur de débit à diaphragme pour liquide avec manomètre différentiel à mercure

3° *Indicateurs de pression.* — Les manomètres (fig. VIII-66) indiquent la pression du fluide à l'intérieur d'une tuyauterie ou d'un réservoir. Ils sont gradués en pression effective, de sorte que le zéro de la graduation correspond à la pression atmosphérique. Il existe des manomètres enregistreurs (fig. VIII-67) qui inscrivent la pression d'une façon continue.

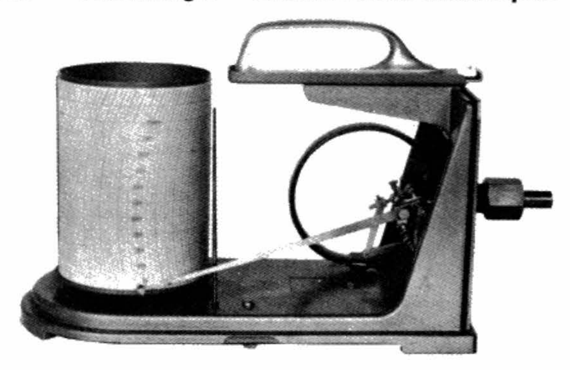


Fig. VIII-67 — Manomètre enregistreur (*Richard*)

Le manomètre Bourdon possède un tube à section elliptique, enroulé, qui se redresse lorsque la pression exercée à l'intérieur augmente. L'extrémité fixe de ce tube (fig. VIII-68) est mise en communication avec le fluide sous pression. L'autre extrémité commande un secteur denté engrenant sur un pignon solidaire d'une aiguille qui se déplace devant un cadran gradué.

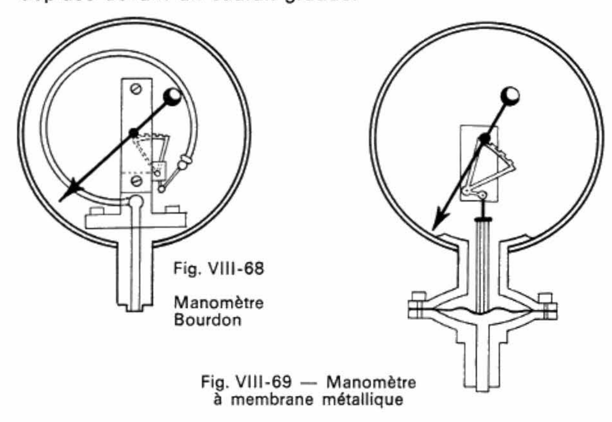


Fig. VIII-68 Manomètre Bourdon

Fig. VIII-69 — Manomètre à membrane métallique

Dans d'autres types, on utilise la déformation d'une membrane métallique (fig. VIII-69) ou de boîtes ondulées de formes variées. Les déformations, très faibles, sont amplifiées par leviers et transmises à l'aiguille.

Un manomètre doit toujours être précédé d'un siphon (fig. VIII-70) dans le cas d'utilisation sur la vapeur et d'un amortisseur si la pression subit des oscillations brusques.

Les déformations du tube Bourdon sont également utilisées pour la mesure des pressions en dessous de la pression atmosphérique. Ce sont les indicateurs de vide gradués en centimètres de mercure ou en mètres d'eau. Pour la mesure précise des vides poussés, il est nécessaire d'avoir recours à des appareils spéciaux (jauge de Mac Leod, jauge à ionisations).

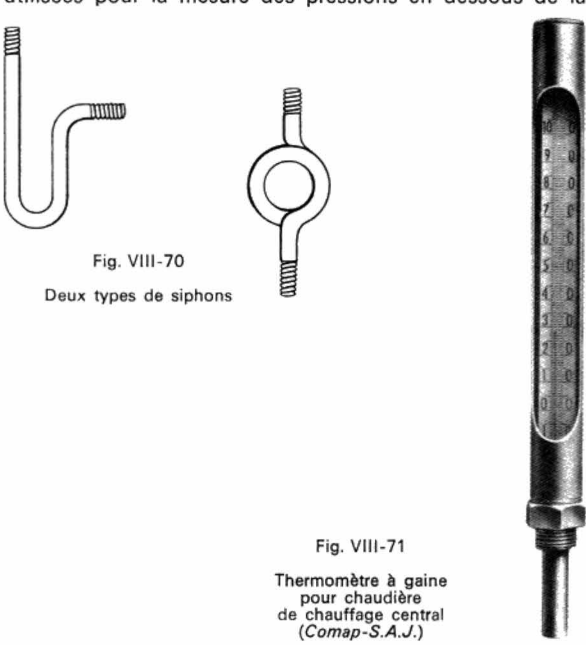


Fig. VIII-70

Deux types de siphons

Fig. VIII-71

Thermomètre à gaine pour chaudière de chauffage central (*Comap-S.A.J.*)

4° *Indicateurs de température.* — Les thermomètres à alcool ou à mercure (fig. VIII-71) sont montés à l'intérieur d'une gaine en laiton fixée sur les récipients ou tuyauteries. La partie inférieure de cette gaine doit être remplie d'huile, afin de permettre une bonne transmission de chaleur de la gaine au thermomètre.

Les thermomètres à cadran et les thermomètres enregistreurs comportent dans leur boîtier une cartouche dilatable dont l'extrémité libre de se mouvoir entraîne le déplacement des organes indicateurs ou enregistreurs. Ceux à prise directe sont munis d'un tube plongeur qui doit être raccordé sur l'enceinte dont la température est à mesurer. Dans les thermomètres pour lecture à distance, qu'ils soient à cadran ou enregistreurs, l'élément sensible à la chaleur (ou sonde) est un petit réservoir cylindrique que l'on place au point de prise de la température. Il est relié au tube manométrique (situé dans le boîtier) par un tuyau capillaire de longueur appropriée.

Dans les thermomètres à cadran, il en existe également à contact basés sur la déformation d'une bilame (ou d'une capsule dilatable) en contact extérieur avec la tuyauterie dont on désire mesurer la température. On utilise aussi des thermomètres électriques à distance où une thermistance placée au point de mesure joue un rôle de potentiomètre (même schéma que figure VIII-62).

5° *Indicateurs de volumes.* — Les compteurs qui servent à totaliser le débit d'un fluide pendant une période donnée peuvent être de types très divers. Les plus courants sont, soit du type à turbine (une turbine est mise en action par le passage du courant fluide traversant le compteur), soit du type volumétrique (le fluide à mesurer est séparé en tranches successives par un piston, un soufflet, un récipient oscillant ou rotatif, et le compteur totalise le nombre des manœuvres effectuées).

3. ROBINETTERIE

Les appareils de robinetterie comprennent les appareils qui, intercalés dans une tuyauterie, ont pour rôle de régler ou d'interrompre le débit du fluide et dont un obturateur de forme appropriée est l'organe principal.

3.1. Terminologie. — Les désignations commerciales souvent créées en vue d'applications particulières et basées sur des points de vue différents, ont amené des confusions regrettables et une multitude d'appellations pour un même type de robinet. Suivant les directives des normes NF E 29-054 à 066, il a été choisi un facteur unique de différenciation : l'obturateur. Les termes à utiliser sont robinet-vanne et non vanne, bien que ce terme soit encore admis, robinet à soupape pour le robinet comportant un obturateur commandé, robinet à tournant et non robinet à boisseau et clapet pour l'appareil possédant un obturateur libre se fermant sous certaines conditions.

Le terme valve a été écarté car il risquait de créer des confusions, avec le même terme déjà utilisé dans un sens très large dans les pays anglo-saxons.

3.2. Robinets-vannes. — Dans les robinets-vannes, l'obturateur appelé vanne ou opercule, commandé par une tige, se déplace parallèlement à ses surfaces de contact. À pleine ouverture, les robinets-vannes présentent l'avantage de ne produire qu'une perte de charge infime. Ils doivent surtout être utilisés comme obturateurs car ce sont de très mauvais organes de réglage. C'est à peu près le seul type d'obturateur utilisé dans les grandes dimensions. Ils sont employés pour tous les fluides : liquides, gaz et vapeur. L'utilisation des très hautes pressions de vapeur avec surchauffe a nécessité la mise au point d'appareils fonctionnant à 100 bars et plus, avec des surchauffes voisines de 550 °C.

1° *À sièges obliques.* — L'obturateur est constitué par un disque dont les faces, également inclinées sur l'axe,

viennent prendre contact avec deux sièges de même inclinaison usinés dans le corps. Lorsque l'obturateur est réalisé en une seule pièce, la vanne est dite à simple opercule ou monobloc (fig. VIII-72 et 73). Si l'obturateur est composé

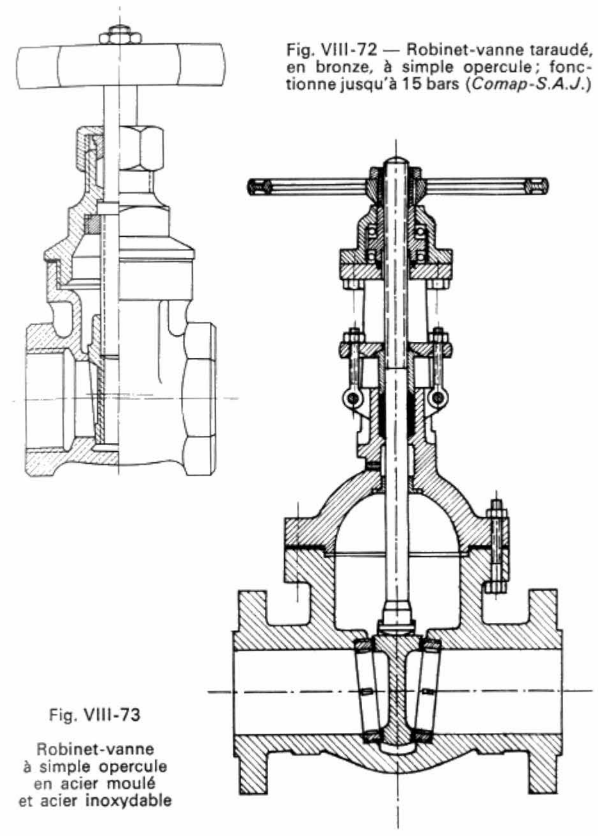


Fig. VIII-72 — Robinet-vanne taraudé, en bronze, à simple opercule; fonctionne jusqu'à 15 bars (*Comap-S.A.J.*)

Fig. VIII-73

Robinet-vanne à simple opercule en acier moulé et acier inoxydable

de deux pièces indépendantes articulées de façon à permettre aux opercules de former un dièdre identique à celui des sièges, la vanne est dite à double opercule (fig. VIII-74). Les deux systèmes donnent des résultats équivalents; le type à simple opercule, plus délicat à réaliser avec précision, donne néanmoins une plus grande garantie de durée et de tenue.

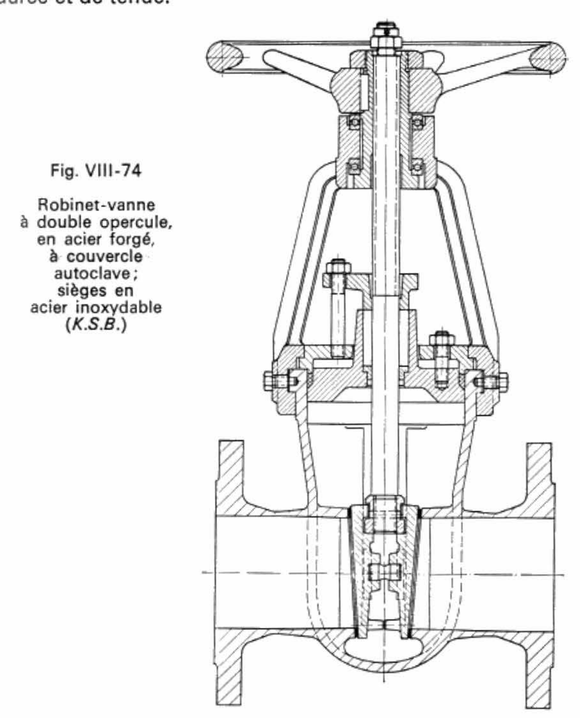


Fig. VIII-74

Robinet-vanne à double opercule, en acier forgé, à couvercle autoclave; sièges en acier inoxydable (*K.S.B.*)

2° *À sièges parallèles.* — L'obturateur est constitué par deux opercules ayant une certaine liberté par rapport au système d'accrochage; ils sont appliqués sur leurs sièges par un coin.

Le mouvement des opercules est obtenu par l'intermédiaire d'un collier, dans lequel vient se visser la tige de la vanne. Les opercules sont maintenus par une agrafe mobile qui évite un trop grand écartement de la partie supérieure de ces opercules. Dans le type à libre dilatation, les opercules sont appliqués sur leurs sièges par un ressort (fig. VIII-75) et la fermeture est obtenue uniquement par un seul opercule: la pression du fluide soulève l'opercule amont et applique l'opercule aval sur son siège.

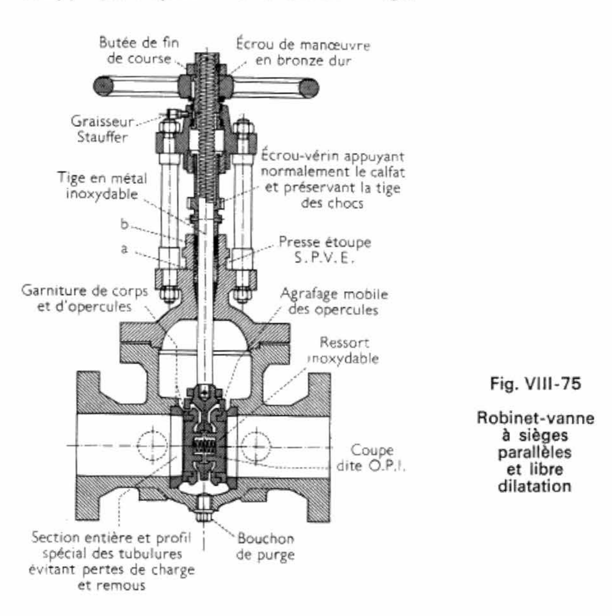


Fig. VIII-75

Robinet-vanne à sièges parallèles et libre dilatation

3.3. Robinets à soupape. — Dans les robinets à soupape, l'obturateur, appelé soupape, se déplace perpendiculairement à son siège. Tous les types de robinets à soupape présentent les mêmes organes essentiels: le corps, le chapeau, la tige et l'obturateur; la différenciation se fait par la forme de l'obturateur.

1° *Soupape conique.* — La portée de la soupape sur son siège s'effectue suivant une surface conique (fig. VIII-76). La soupape est commandée par une tige

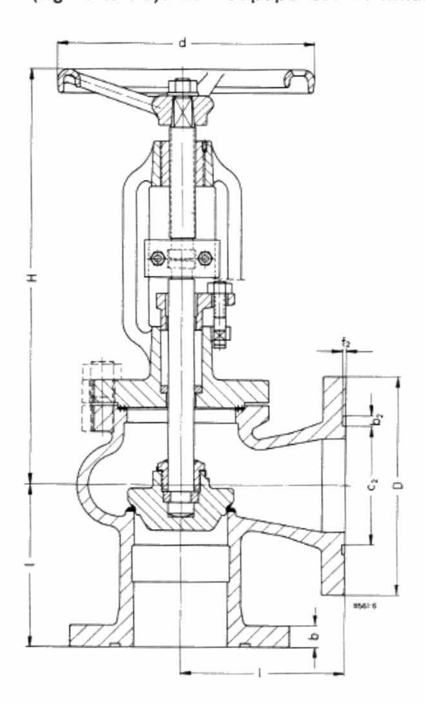


Fig. VIII-76

Robinet à soupape conique à passage d'équerre en acier moulé; sièges constitués par un apport de stellite (*K.S.B.*)

dont elle est solidaire mais la fixation est telle que la tige puisse tourner sans entraîner la soupape dans son mouvement de rotation, de façon à éviter tout grippage des surfaces de contact au moment de la fermeture. La conservation de l'étanchéité est uniquement fonction de la tenue des surfaces de contact et, pour obtenir une longue durée de service, il est nécessaire d'avoir recours à des métaux très durs et inoxydables, dans lesquels les impuretés ne puissent s'incruster. Aussi les sièges sont-ils le plus souvent rapportés dans les corps et fixés par vissage, par sertissage, par emmanchement à la presse ou par soudure. Les clapets peuvent comporter des ailettes de guidage dans le siège ou dans une chemise située à la partie supérieure mais la tendance actuelle est la suppression totale de ces ailettes qui réduisent la section de passage et risquent de produire des coincements dans le cas d'utilisation à haute température. La circulation du fluide est en général prévue avec arrivée sous le clapet, afin de ne pas laisser sous pression les garnitures d'étanchéité de la tige pendant la fermeture du robinet. Par exception, l'arrivée peut se faire au-dessus du clapet dans les très grandes dimensions, pour éviter le flambage de la tige et faciliter l'étanchéité. Les robinets à pointeau ne sont qu'une variante de robinets à soupape conique dans lesquels l'obturateur est constitué par l'extrémité conique de la tige et porte alors le nom de pointeau (fig. VIII-77). Ce type de robinet est utilisé pour les petites dimensions dans lesquelles le diamètre de l'orifice permet difficilement de réaliser un obturateur articulé sur la tige.

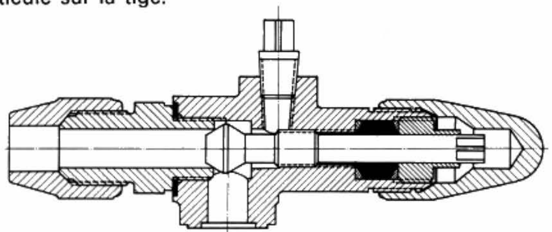


Fig. VIII-77 — Robinet à pointeau pour appareillages frigorifiques

2° *Soupape plane.* — La forme plane des surfaces de contact est la seule différence par rapport au système précédent (fig. VIII-78). La supériorité de l'un ou de l'autre de ces deux systèmes n'a pas encore été prouvée ; cependant, la fabrication actuelle, surtout dans la robinetterie soignée, s'oriente vers le siège plan qui semble donner de meilleurs résultats.

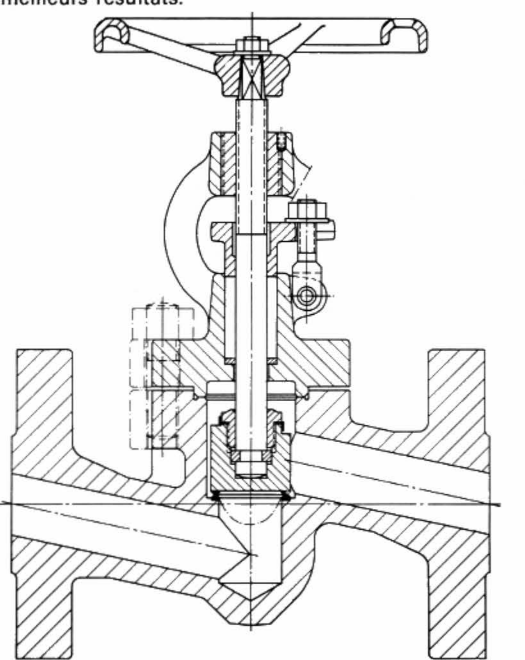


Fig. VIII-78 — Robinet à soupape plane en acier forgé avec sièges en stellite (*K.S.B.*)

Une solution plus économique, utilisée surtout pour les robinets de petites dimensions, consiste à remplacer la surface de contact métallique de la soupape par un matériau pouvant se déformer et s'adapter parfaitement à la surface du siège, malgré l'interposition de petites impuretés. Les robinets à disque plastique utilisent ce principe qui est applicable même pour des pressions élevées (fig. VIII-79).

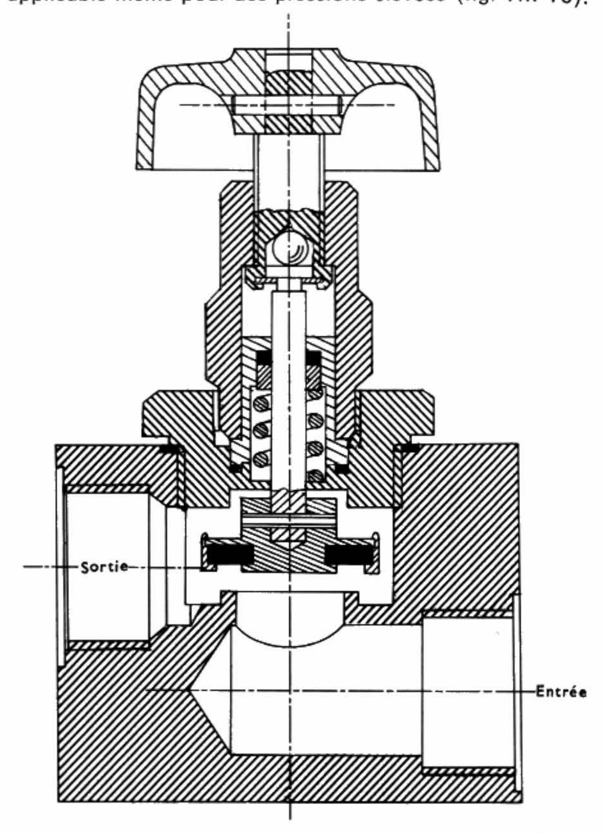


Fig. VIII-79 — Robinet à soupape à disque plastique ; pression maximale d'utilisation : 50 bars (*ETNA*)

Dans la robinetterie sanitaire, le disque d'obturation est en caoutchouc pour l'eau froide (fig. VIII-80) ou en fibre pour l'eau chaude. Ce système est aussi utilisé pour les robinets de bouteilles de gaz comprimés (par exemple, robinet de bouteille d'oxygène à disque en ébonite sur siège en laiton : fig. VIII-81).

Remarque : les robinets à soupape sont d'excellents obturateurs, mais entraînent des pertes de charge assez élevées, tout au moins dans les réalisations anciennes. Les constructeurs se sont attachés à diminuer ces pertes, en

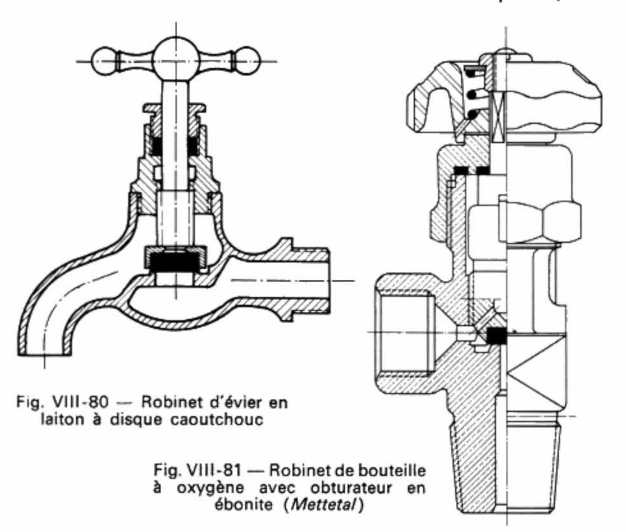


Fig. VIII-80 — Robinet d'évier en laiton à disque caoutchouc

Fig. VIII-81 — Robinet de bouteille à oxygène avec obturateur en ébonite (*Mettetal*)

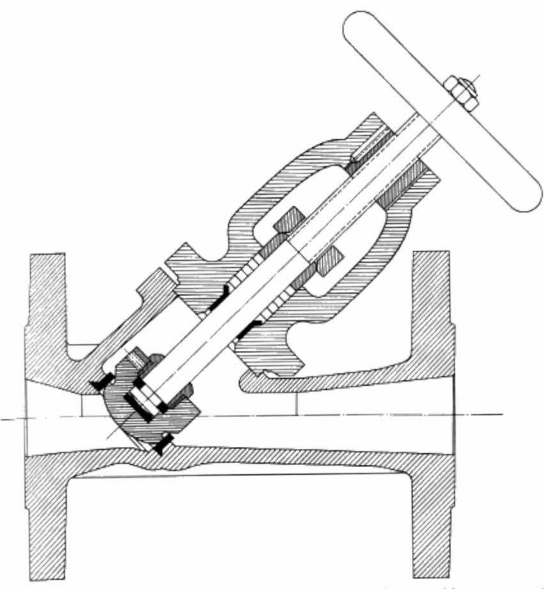


Fig. VIII-82 — Robinet à soupape conique en acier moulé avec arcade et tige montante ; contacts en acier inoxydable (*Comap-S.A.J.*)

modifiant les formes intérieures pour réduire au minimum les turbulences et les remous. Deux solutions heureuses ont été mises au point; le robinet à soupape oblique (fig. VIII-82), dans lequel le passage du fluide se fait d'une façon sensiblement rectiligne, et le robinet à soupape profilé (fig. VIII-83), dans lequel une étude approfondie des

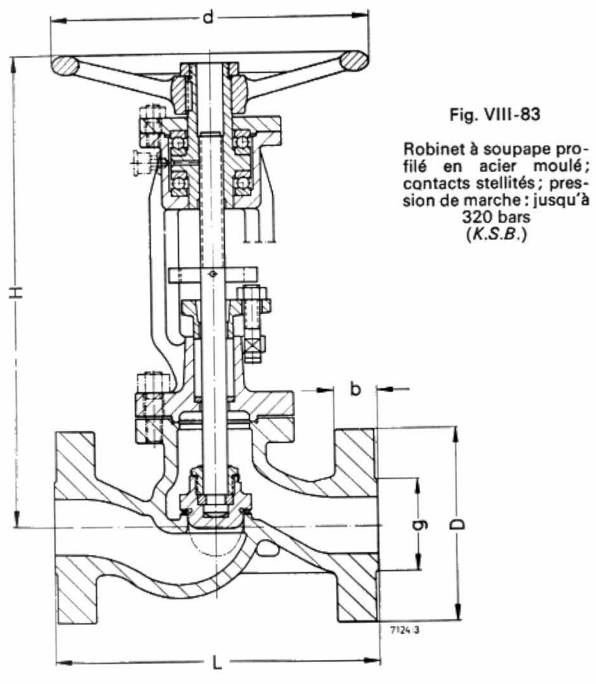


Fig. VIII-83

Robinet à soupape profilé en acier moulé; contacts stellités; pression de marche : jusqu'à 320 bars (*K.S.B.*)

sections de passage et des profils intérieurs a permis de réduire la perte de charge à une valeur très faible, en supprimant toutes les cavités nuisibles à un écoulement rationnel. Par ailleurs, la sensibilité du réglage obtenu avec ces robinets est grande mais on peut encore l'améliorer en faisant pénétrer dans le passage du siège une partie de l'obturateur de forme parabolique (traits mixtes : V. fig. 78 et 83).

3.4. Robinets à tournant. — Dans ce type de robinet (improprement appelé robinet à boisseau) l'obturateur, appelé *tournant*, est constitué par un solide de révolution percé d'orifices appelés *lumières* ; il tourne autour de son axe à l'intérieur d'un corps appelé *boisseau*. Le robinet à tournant est surtout destiné à ouvrir ou fermer une circulation de fluide ou à établir plusieurs circuits par une seule manœuvre. Il est peu employé comme robinet de réglage. Il possède l'avantage d'une perte de charge réduite, joint à la rapidité de manœuvre (simple pivotement d'un demi ou d'un quart de tour). En revanche, il est déconseillé pour les températures élevées. Les lumières peuvent être disposées de différentes manières : dans un robinet à deux directions (fig. VIII-84), la lumière traversant le tournant permet d'établir ou d'interrompre la circulation du fluide ; dans un

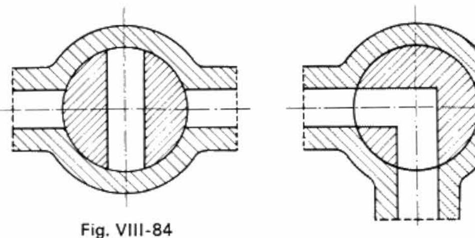


Fig. VIII-84

Robinet tournant à deux directions

Fig. VIII-85

Robinet tournant à trois directions ; deux lumières d'équerre

robinet à trois directions, le tournant peut présenter soit deux lumières d'équerre (fig. VIII-85), soit trois lumières en té (fig. VIII-86), suivant les combinaisons que désire réaliser l'utilisateur ; dans un robinet à quatre directions (fig.

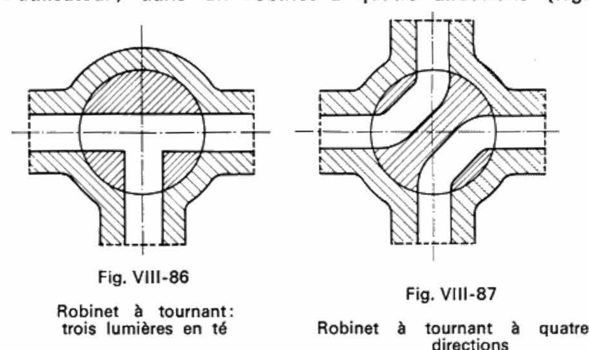


Fig. VIII-86

Robinet à tournant : trois lumières en té

Fig. VIII-87

Robinet à tournant à quatre directions

VIII-87), les deux lumières permettent le couplage des différents départs deux à deux ; enfin, la circulation peut également s'effectuer suivant l'axe du tournant : c'est le cas du tournant défoncé (fig. VIII-88).

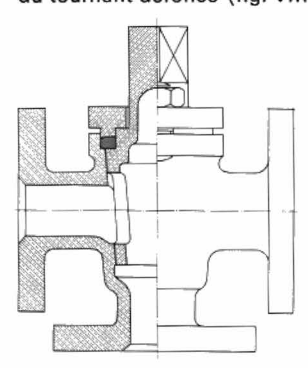


Fig. VIII-88 — Robinet à tournant défoncé à trois voies d'équerre en bronze et à brides

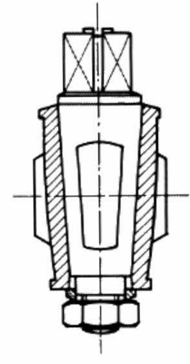


Fig. VIII-89

Lorsque le corps ou boisseau est ouvert, en haut et en bas, l'étanchéité de l'obturateur étant obtenue par le serrage d'un écrou inférieur, le robinet est dit à boisseau défoncé (fig. VIII-89 et 90). Si l'étanchéité est obtenue



Fig. VIII-90

Robinet à tournant à brides, en bronze, à trois voies et à boisseau défoncé (*Comap-S.A.J.*)

Fig. VIII-91

Robinet à boisseau foncé

Fig. VIII-92 — Robinet à tournant, taraudé, en fonte, à boisseau foncé (*Comap-S.A.J.*)

par le serrage d'une bride supérieure appliquant le tournant sur le boisseau, le robinet est dit à boisseau foncé (fig. VIII-91 et 92). Certains robinets, notamment ceux utilisés dans les distributions d'air comprimé, sont à tournant inversé (fig. VIII-93) car l'étanchéité est obtenue par la poussée d'un ressort à la partie inférieure du tournant. Dans les robinets



Fig. VIII-93

Robinet à tournant inversé, taraudé, en bronze pour air comprimé

à tournant sphérique, l'obturateur est une sphère traversée par un passage cylindrique (fig. VIII-94). En position ouverte, ces robinets présentent une perte de charge pratiquement nulle. En position fermée, l'anneau joint (1) se trouve dans le prolongement du siège mobile (2) monté dans le corps. Ce siège, en position ouverte, demeure effacé sous l'action des ressorts (3) ; il est appliqué, en position fermée, contre l'anneau (1) par une pression d'eau dans la chambre (4). Ce type de robinet est utilisé dans les installations hydrauliques, en particulier comme vanne de garde de turbine ; le diamètre de conduite peut atteindre 2,4 m et la pression de marche 125 bars. On rencontre également ce genre d'obturateur sur les canalisations de transport de gaz ou d'hydrocarbures, en particulier sur les pipe lines, cas où les dimensions du passage permettent la circulation des boules qui séparent deux produits différents se succédant dans la tuyauterie.

La grande majorité des robinets à tournant se manœuvrent avec une clé venant se placer sur un carré terminant l'extrémité du tournant. Dans les petits robinets, une poignée en bois ou métallique fait corps avec le tournant. Dans les grosses dimensions, la commande du tournant se fait par l'intermédiaire d'engrenage ou de systèmes à vérin. Pour obtenir une étanchéité suffisante, il est souvent nécessaire de serrer énergiquement les écrous de serrage du tournant, ce qui rend pénible la manœuvre de ces robinets. Afin de faciliter cette manœuvre, il a été créé des robinets avec rainures de graissage, permettant de diminuer le frottement entre les parties en contact (fig. VIII-95).

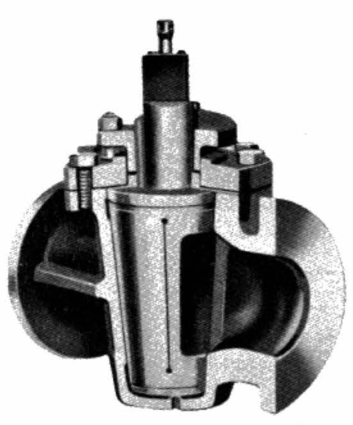


Fig. VIII-95

Robinet à tournant à brides ; on distingue une raie prévue pour la lubrification (*Audco*)

Quand la tuyauterie est destinée à véhiculer des produits épais, à la température ambiante, comme les brais et les goudrons, on utilise des robinets à tournant à enveloppe chauffante (fig. VIII-96) dans lesquels une circulation extérieure de vapeur facilite la manœuvre du tournant.

3.5. Robinets à papillon. — L'obturateur est constitué par un disque de forme généralement elliptique qui pivote autour du petit axe de l'ellipse et qui, en position fermée, est tangent à sa périphérie avec le diamètre intérieur du

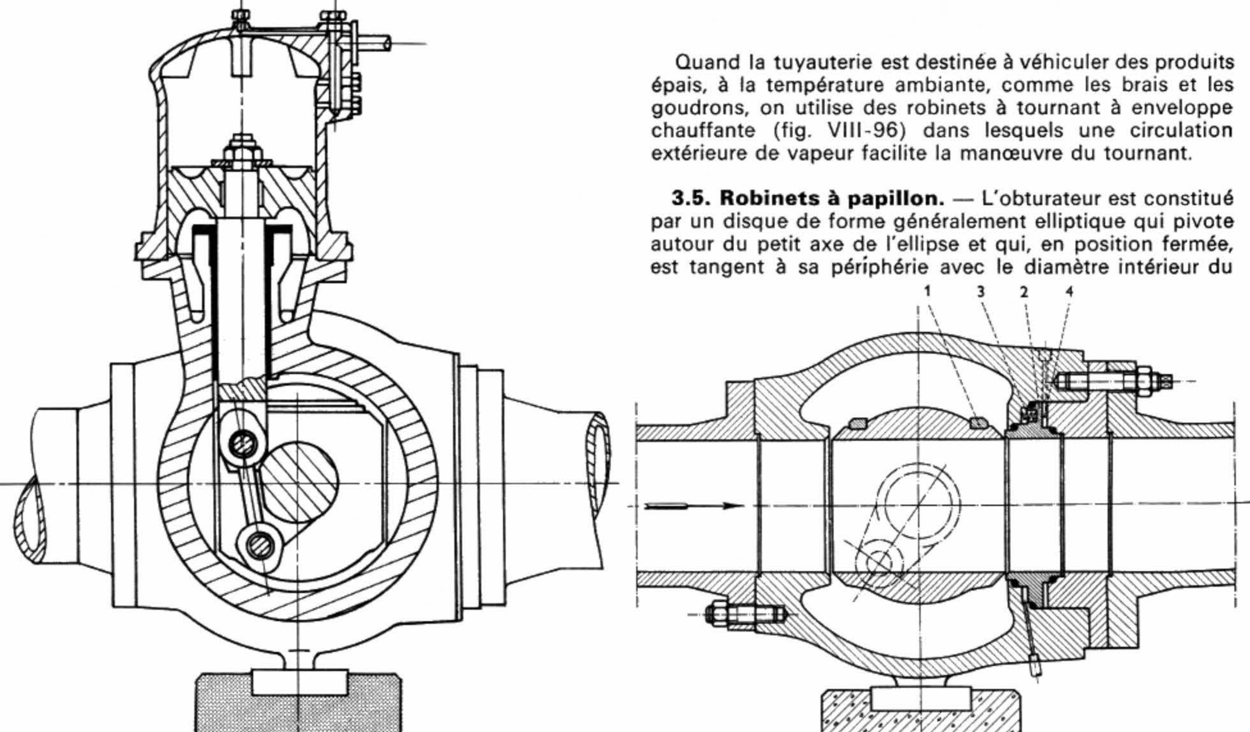


Fig. VIII-94 — Vanne sphérique : détail de la commande et vue en position ouverte (*Ateliers des Charmilles*)

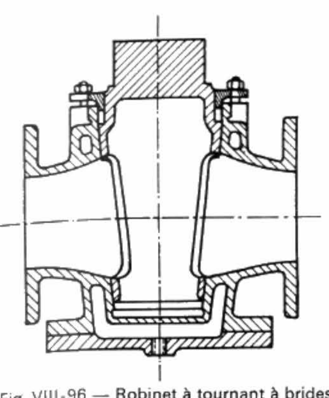


Fig. VIII-96 — Robinet à tournant à brides, en fonte, avec enveloppe de vapeur (à la partie inférieure) pour liquides épais (*Thévignot*)



Fig. VIII-97 — Robinet à brides, en laiton

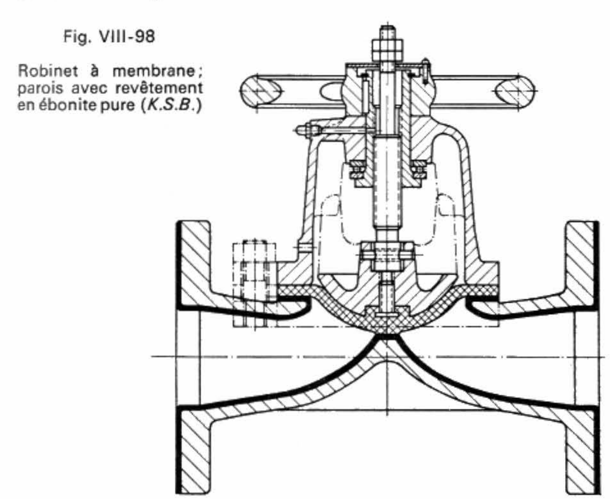
corps (figure VIII-97). Le principal défaut de ces robinets était la non-étanchéité à la fermeture; des améliorations récentes ont permis d'y remédier grâce à une garniture déformable (par exemple, joint torique en caoutchouc).

Les robinets à papillon du type non étanche sont exclusivement réservés au réglage des débits, mais ceux du type étanche peuvent être également utilisés comme organe d'arrêt dans le cas des fluides froids. Ces derniers sont employés comme vannes de garde de turbines hydrauliques ou comme vannes de sécurité de conduites forcées et ils peuvent alors atteindre de très grandes dimensions (jusqu'à 5,3 m de diamètre).

3.6. Robinets à paroi déformable. — Utilisés dans l'industrie chimique, ces robinets ont été étudiés pour éviter la corrosion des organes de commande par le fluide véhiculé. Leur emploi dans l'industrie alimentaire évite toute souillure du fluide. L'étanchéité est obtenue par une déformation de la paroi élastique: membrane (fig. VIII-98) ou manchon. Ces robinets donc ne comportent pas de presse-étoupe autour de la tige.

Fig. VIII-98

Robinet à membrane; parois avec revêtement en ébonite pure (*K.S.B.*)



3.7. Clapets de retenue. — Les clapets sont des appareils à fonctionnement automatique destinés à empêcher le passage du fluide dans certaines conditions; on les désigne généralement par leur fonction. Dans ces appareils, l'obturateur, appelé clapet, ne possède pas d'organe de commande extérieure.

1° *Clapets de non-retour.* — Ils sont destinés à empêcher le passage du fluide en sens inverse du sens normal de circulation. Les sièges peuvent être plans ou coniques et le clapet comporte un système de guidage quelconque. Le type à ailettes à clapet caoutchouc est, par exemple, utilisé pour les clapets des pompes (clapets de

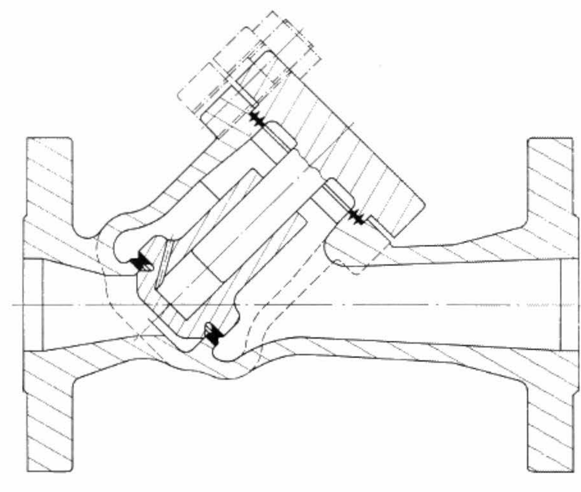


Fig. VIII-99 — Clapet de retenue à clapet guidé, en acier moulé; contact en acier inoxydable ou stellite (*K.S.B.*)

pied). Le type à clapet guidé (fig. VIII-99) peut être monté sur une conduite verticale ou horizontale. Il convient aux fortes pressions et en particulier à la vapeur. Dans les conduites de fluides à faible vitesse, dans lesquelles les pertes de charge ne doivent pas être trop importantes, on utilise les clapets de non retour à clapet articulé (fig. VIII-100), souvent dénommés clapets à battant. Pour les

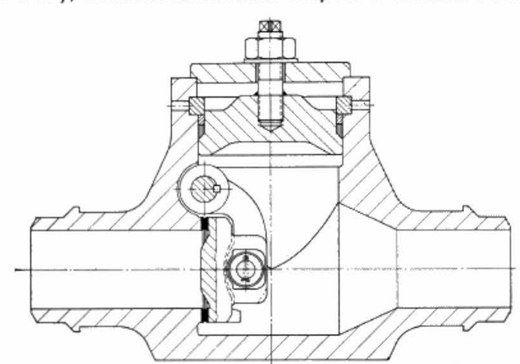


Fig. VIII-100 — Clapet de retenue à battant articulé; corps en acier forgé; contacts en stellite (*K.S.B.*)

orifices de petites dimensions, on emploie un clapet sphérique (fig. VIII-101) ou clapet à bille.

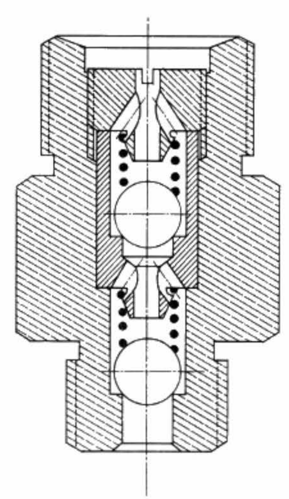


Fig. VIII-101

Clapet de retenue double à bille pour circuit de graissage sous pression; il est constitué de deux clapets à bille fonctionnant simultanément qui procurent une étanchéité meilleure qu'un seul (*Comap-S.A.J.*)

2° *Clapets d'arrêt.* — Utilisés comme organes de sécurité sur les conduites de vapeur, ils doivent interrompre la circulation dès que la vitesse de déplacement du fluide dépasse une valeur fixée, par exemple en cas de rupture de la

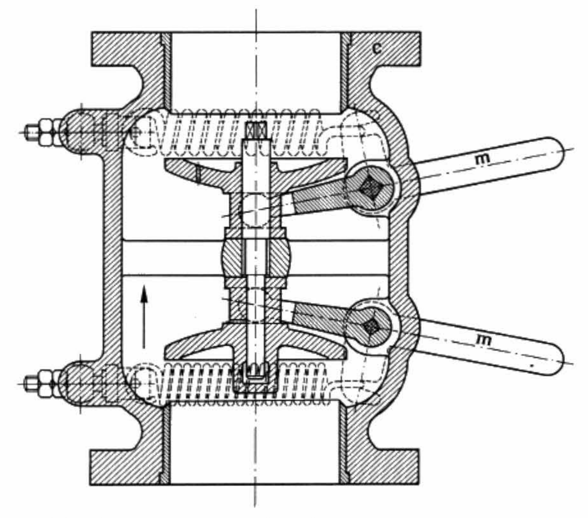


Fig. VIII-102 — Clapet automatique d'arrêt de vapeur à double effet, à brides, en fonte et en bronze (*Cocard*)

conduite. Ainsi, dans un clapet automatique d'arrêt de vapeur à double effet (fig. VIII-102), le clapet inférieur, dont le poids est équilibré par un ressort, peut fonctionner pour la plus faible inversion du courant de vapeur, tandis que le clapet, supérieur est maintenu ouvert par un ressort puissant tel que seules des vitesses anormales de circulation (150 m/s, par exemple) puissent le fermer. Des poignées de manœuvre permettent de vérifier le fonctionnement normal des clapets.

3.8. Soupapes automatiques. — Les soupapes automatiques sont destinées à limiter la pression d'un fluide à une valeur déterminée. Suivant leur fonction, on trouve des soupapes automatiques d'échappement ou soupapes de sûreté et des soupapes automatiques d'admission.

1° *Soupapes de sûreté.* — Elles sont destinées à limiter la pression à l'intérieur d'une enceinte en évacuant l'excès de fluide. En principe, ces appareils comportent un obturateur à soupape soumis sur une face à la pression du fluide et sur l'autre face à l'action d'une charge qui équilibre la première force. Tant que la pression reste normale, l'action de la charge reste prépondérante et l'obturateur reste appuyé sur son siège.

La soupape doit s'ouvrir nettement, sans fuser, à une pression dite pression de tarage. Le débit maximal est atteint pour une pression légèrement plus élevée qui, en général, est supérieure d'environ 3 % à la pression de tarage. Ensuite, lorsque la pression baisse, la levée diminue progressivement jusqu'à ce que la soupape ferme franchement à une pression qui est inférieure d'environ 4 % à la pression de tarage.

La pression de service maximale prévue dans l'enceinte doit toujours être inférieure à la pression pour laquelle la soupape se referme (après chute de pression). En effet, l'effort de la vapeur sur le clapet équilibrant la charge à la pression de tarage, il est évident que plus la pression de service est voisine de cette pression de tarage, plus est faible l'effort appliquant le clapet sur son siège et plus grandes sont les chances de fuites avec détérioration des portées. La dépression sous le clapet, causée à l'ouverture de la soupape par la mise en vitesse du fluide qui s'échappe, tend à provoquer la retombée du clapet sur son siège. Il s'ensuit un mouvement oscillatoire de ce clapet, particulièrement sensible dans le cas de la vapeur et préjudiciable au bon fonctionnement de la soupape qui ne peut évacuer la vapeur en excès. Diverses dispositions sont utilisées pour stabiliser l'ouverture du clapet. Dans la soupape à échappement progressif, on utilise l'action dynamique du fluide sur un disque placé au-dessus du clapet (fig. VIII-103 et 104). Dans la soupape à membrane, la pression du fluide

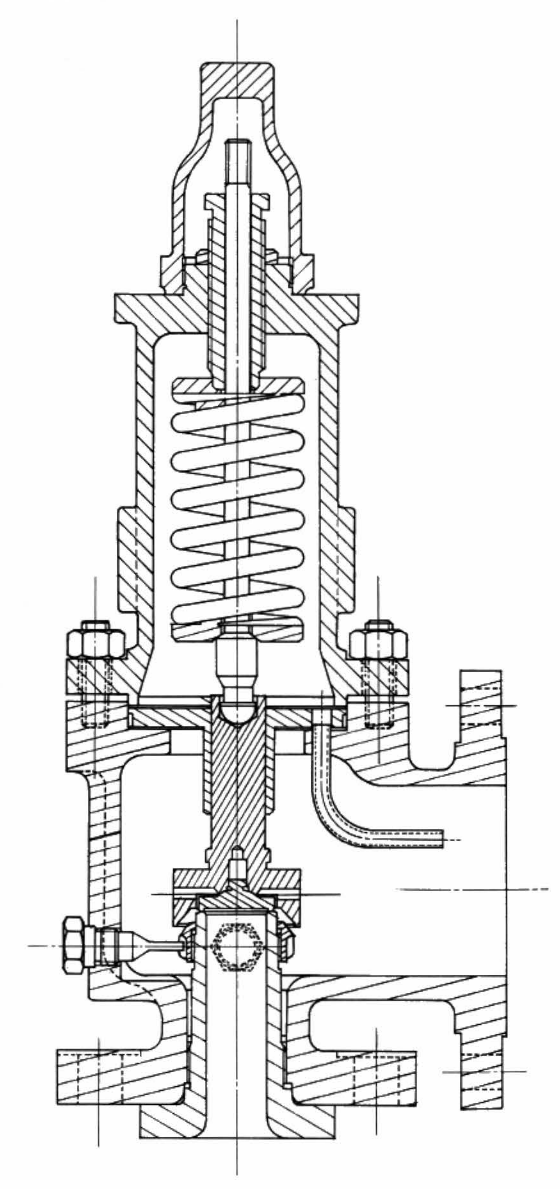


Fig. VIII-104 — Soupape de sûreté à échappement progressif (*SAPAG*)

est appliquée non au clapet mais à une membrane liée à celui-ci et soumise à l'action du ressort taré (fig. VIII-105).

— Les soupapes de sûreté à charge directe (fig. VIII-106) comportent simplement un poids appliqué au centre de l'obturateur et ne sont utilisées que pour les faibles pressions (inférieures à un décanewton par centimètre carré).

— Les soupapes de sûreté à contrepoids (V. fig. VIII-103) conviennent pour des pressions moyennes: la charge

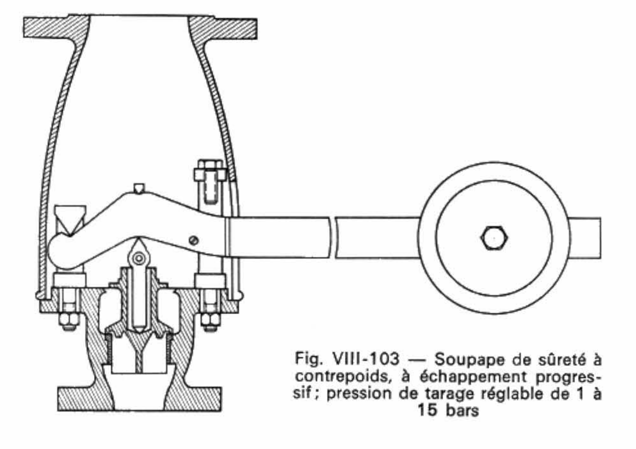


Fig. VIII-103 — Soupape de sûreté à contrepoids, à échappement progressif; pression de tarage réglable de 1 à 15 bars

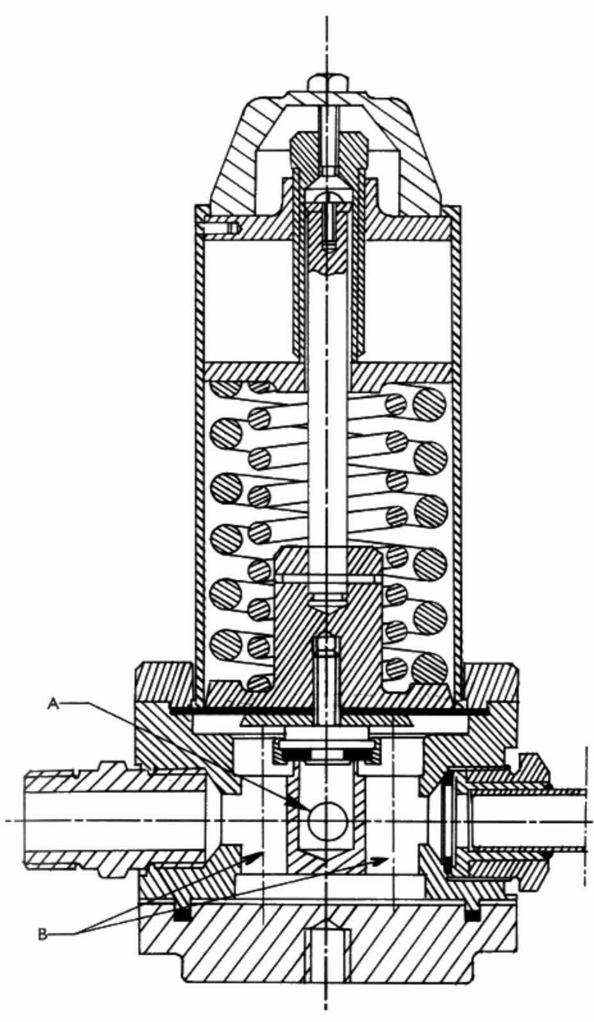


Fig. VIII-105 — Soupape de sûreté à membrane
A) Orifice d'échappement
B) Canaux d'amenée (*ETNA*)

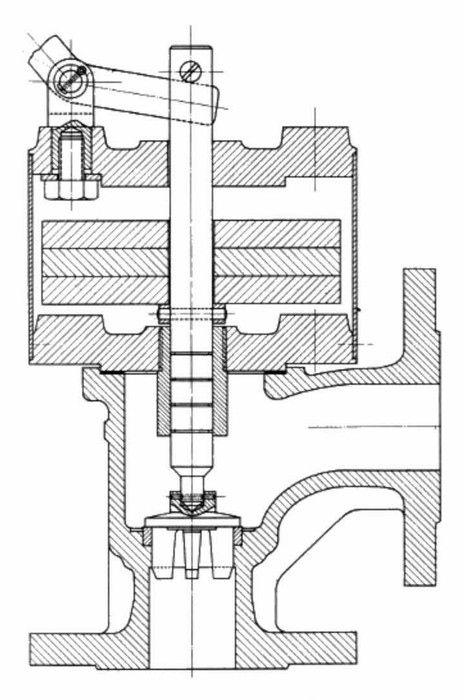


Fig. VIII-106 — Soupape de sûreté à charge directe, à brides et levier de décalage, type d'équerre, en fonte et en bronze

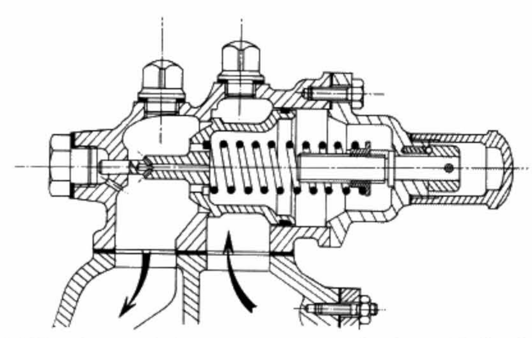
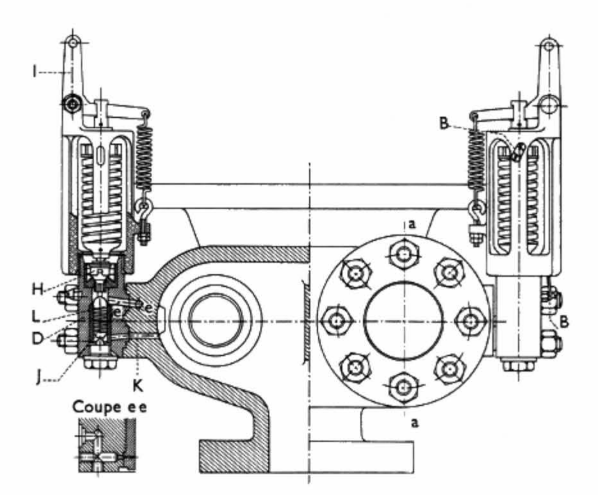


Fig. VIII-107 — Soupape de by-pass pour pompe volumétrique (*Guinard*)

s'exerce sur le clapet par l'intermédiaire d'un levier. On règle la pression de tarage par déplacement du contrepoids sur le levier. Ce système ne peut être utilisé sur les appareils mobiles à cause des trépidations qui en provoqueraient le déréglage.

— Les soupapes de sûreté à ressort s'appliquent à toutes les pressions. L'effort de fermeture est exercé par un ressort dont l'action sur le clapet peut être tarée grâce à une vis de réglage (fig. VIII-107) : soupape de by-pass pour pompe volumétrique, soupape de sûreté pour vapeur (V. fig. VIII-104).

— Les soupapes de sûreté à clapet pilote sont destinées à l'évacuation de grandes quantités de vapeur à haute pression. Elles comprennent une soupape principale (*N*) de grande dimension, qui a pour rôle d'évacuer la vapeur, et une soupape pilote (*H*), placée en dehors du flux, qui commande l'ouverture de la soupape principale (fig. VIII-108). Le fonctionnement est le suivant : la pression agit sur un piston (*J*) communiquant avec la chaudière par un conduit (*K*) ; à la pression de tarage, la soupape (*H*) s'ouvre, permettant à la vapeur agissant derrière le piston (*P*) de s'échapper à l'atmosphère par le conduit (*L*). Le clapet de décharge s'ouvre alors largement, jusqu'à ce que



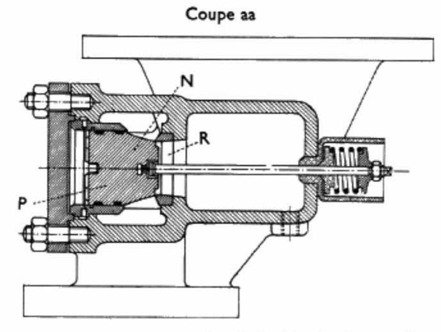


Fig. VIII-108 — Soupape de sûreté double à clapet pilote (*Cocard*)

la soupape pilote (*H*) retombe sur son siège. À ce moment, la pression remonte derrière le piston (*P*) et oblige le clapet (*N*) à se fermer.

Remarque : détermination des soupapes de sûreté. — La conception de la soupape et ses formes intérieures pouvant, pour une section de même diamètre, faire varier le débit dans de très grandes proportions, il n'est pas possible d'indiquer une formule générale permettant de calculer les dimensions à adopter pour un problème déterminé. Il est nécessaire de se reporter aux courbes données par les constructeurs en tenant compte de tous les paramètres: pressions de tarage, de plein débit et de fermeture, contre-pression éventuelle, température et densité du fluide.

2° *Soupapes automatiques d'admission.* — Elles fonctionnent exactement à l'inverse des soupapes automatiques d'échappement, car elles laissent pénétrer un fluide extérieur (en général, de l'air) à l'intérieur d'une enceinte, en limitant la dépression intérieure. Ces appareils sont connus sous le nom de casse-vide ou reniflards. Ils sont en général combinés avec une soupape de sûreté (fig. VIII-109) : destinés à être montés sur les réservoirs d'hydrocarbures, ils évacuent l'air lors du remplissage (clapet supérieur) et permettent la rentrée de l'air en cas de dépression intérieure due à des condensations de vapeurs par refroidissement (clapet inférieur).

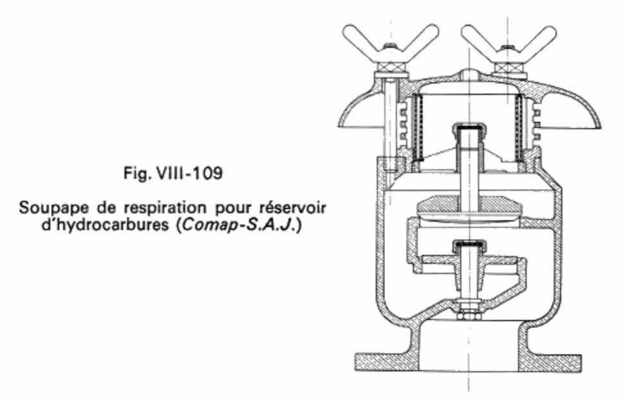


Fig. VIII-109

Soupape de respiration pour réservoir d'hydrocarbures (*Comap-S.A.J.*)

3.9. Appareils dérivés. — Un certain nombre d'appareils de robinetterie sont, soit des combinaisons d'appareils de type défini, soit des adaptations particulières. Parmi les plus connus, on retiendra :

1° *Robinets à flotteur.* — Ils sont destinés à régler le débit d'alimentation suivant les fluctuations de niveau d'un liquide. L'organe moteur est constitué par un flotteur qui est relié par un levier ou une tringlerie à un obturateur auquel il transmet son mouvement. Le type le plus simple et le plus connu (fig. VIII-110) est le robinet à flotteur utilisé dans les réservoirs de chasse d'eau.

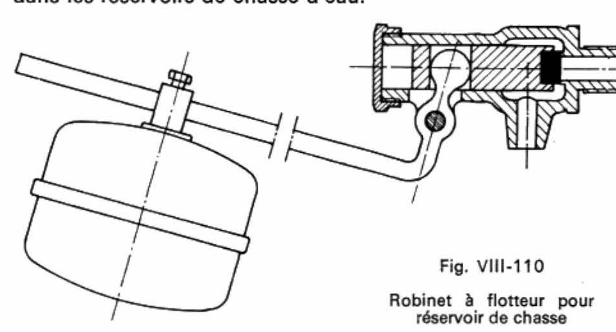


Fig. VIII-110

Robinet à flotteur pour réservoir de chasse

2° *Détendeurs de pression.* — Ce sont des robinets à fonctionnement automatique qui créent une chute de pression. Ils sont commandés par la pression aval qu'ils maintiennent sensiblement constante. Si le problème est relativement simple dans le cas d'un débit et d'une pression amont constants, il est nécessaire, lorsque ces deux facteurs subissent des variations importantes, d'avoir recours à des appareils complexes, qui doivent être stables, insensibles aux impuretés et être étanches en cas d'arrêt du débit fluide. Dans la plupart des cas, pour augmenter la sensibilité, on a intérêt à choisir le détendeur du plus petit diamètre compatible avec le débit maximal demandé à l'appareil.

— Les détendeurs à piston (fig. VIII-111) ont un obturateur du type équilibré solidaire d'un piston. Ce piston est soumis sur une face à la pression aval (devant être maintenue constante) et, sur l'autre face, à une poussée exercée par un contrepoids réglable ou par un ressort. Si la pression détendue augmente, la pression exercée sur la face inférieure du piston augmente et l'obturateur se ferme, diminuant l'admission du fluide haute pression jusqu'à ce que l'équilibre soit retrouvé, et inversement.

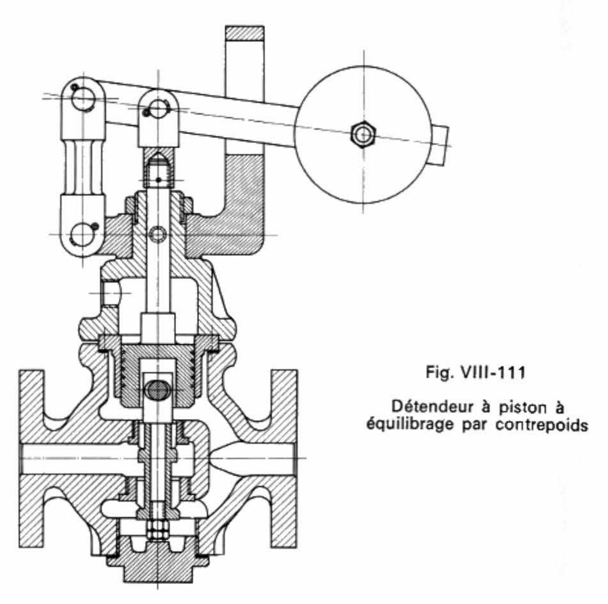


Fig. VIII-111

Détendeur à piston à équilibrage par contrepoids

— Les détendeurs à membrane où le piston est remplacé par une membrane ont une surface de l'organe de commande beaucoup plus grande. Cela permet, soit d'augmenter la sensibilité de l'appareil, soit d'utiliser une soupape simple à la place de la soupape équilibrée. Cette dernière solution améliore l'étanchéité à la fermeture (fig. VIII-112). La première est employée dans les détendeurs utilisés pour la vapeur (fig. VIII-113) où la membrane est placée vers le bas afin d'être protégée de la vapeur vive par une couche d'eau de condensation. Le clapet (*C*) qui règle la section de passage de la vapeur est commandé par un clapet pilote (*N*) équilibré soumis à deux actions opposées: ressorts extérieurs (*r*) et vapeur détendue; cette dernière, amenée dans le tube refroidisseur (*T*) par un tuyau (*t*), agit sur la membrane (*M*). On remarque que l'appareil est asservi par le fait que les mouvements du clapet principal (*C*) annulent les déplacements du clapet pilote qui les ont provoqués.

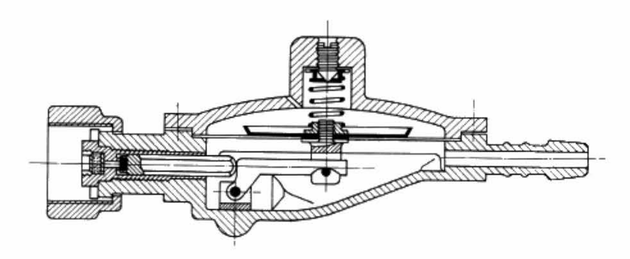


Fig. VIII-112 — Détendeur à membrane (utilisé pour bouteilles de gaz butane) (*Mettetal*)

3.10. Accessoires de robinetterie

1° *By-pass.* — C'est un obturateur secondaire qui permet d'annuler, ou tout au moins de réduire, l'écart de pression entre les deux faces de l'obturateur principal pour en faciliter l'ouverture. Dans les robinets de grande dimension, des bossages extérieurs venus de fonderie permettent d'adjoindre le robinet de by-pass.

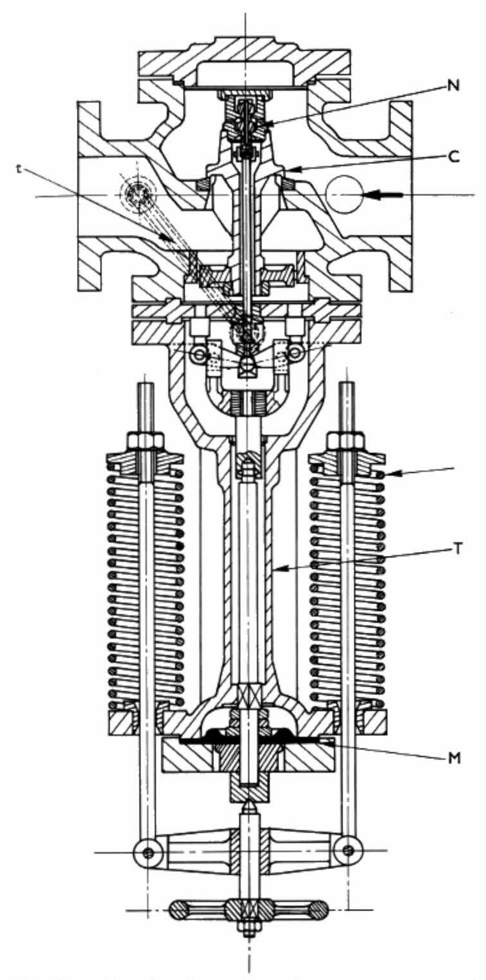
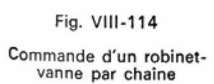


Fig. VIII-113 — Détendeur à membrane à ressorts et soupape équilibrée (*Cocard*)

2° *Commande des robinets.* — La commande manuelle normale des robinets à vis de manœuvre s'effectue à l'aide d'un volant fixé sur la tige par un carré. Les robinets sont quelquefois placés dans des endroits difficilement accessibles ; on adopte alors, soit la commande par chaîne (fig. VIII-114) avec un guide-chaîne de sécurité, soit la commande par l'intermédiaire d'engrenages droits ou coniques, avec volant, colonne de manœuvre et tige de commande (fig. VIII-115).



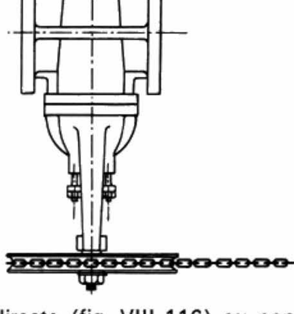


Fig. VIII-114

Commande d'un robinet-vanne par chaîne

La commande électrique directe (fig. VIII-116) ou non (fig. VIII-117), est adoptée, soit dans le cas de manœuvre très rapide, soit pour des robinets de dimension importante dont la manœuvre manuelle serait beaucoup trop lente et pénible ; enfin, elle permet la commande à distance à partir d'un ou de plusieurs points. Dans une installation complexe, toutes les commandes peuvent ainsi être faites d'un poste central, des voyants lumineux permettant à chaque instant de connaître la position des divers obturateurs. Les robinets peuvent également être commandés par

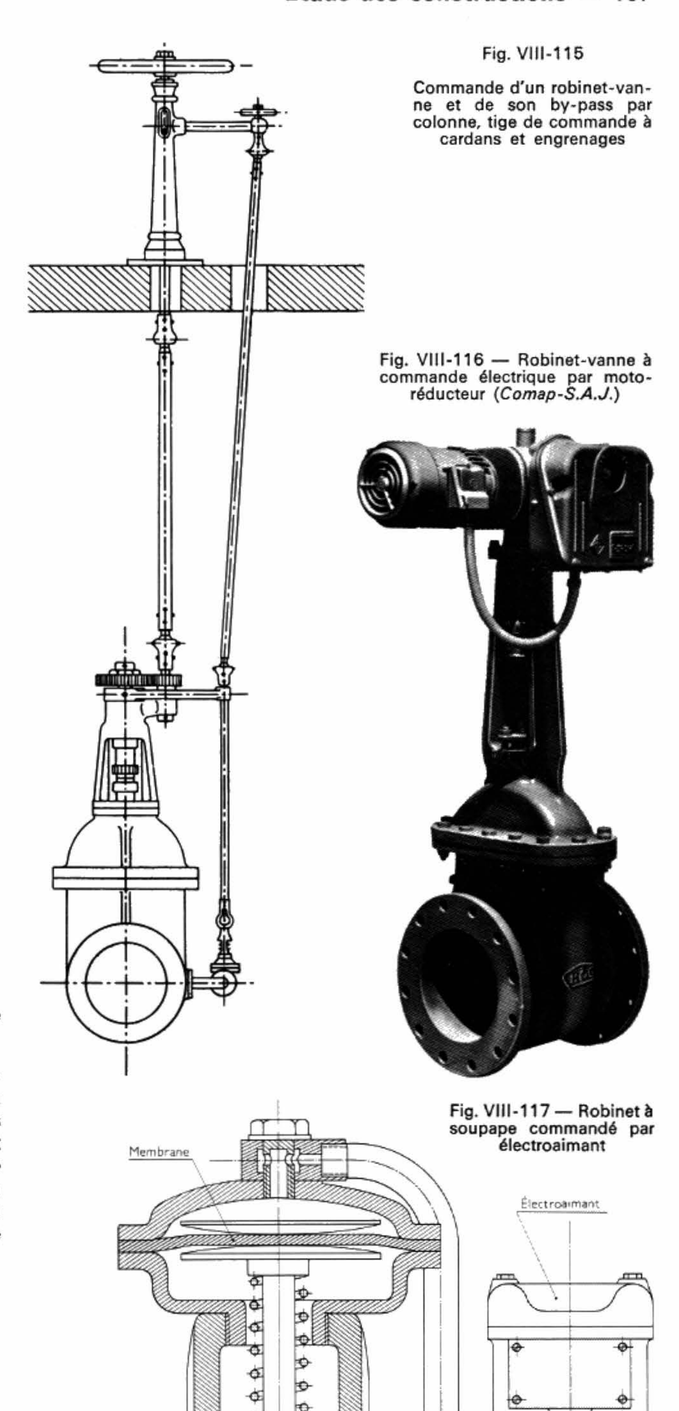


Fig. VIII-115

Commande d'un robinet-vanne et de son by-pass par colonne, tige de commande à cardans et engrenages

Fig. VIII-116 — Robinet-vanne à commande électrique par motoréducteur (*Comap-S.A.J.*)

Fig. VIII-117 — Robinet à soupape commandé par électroaimant

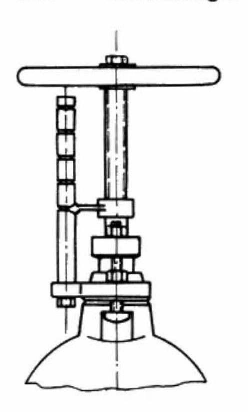
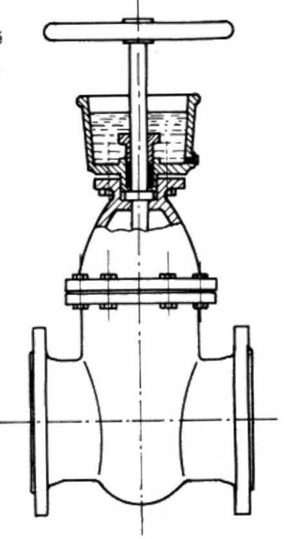


Fig. VIII-118

Indicateur d'ouverture pour vanne à tige fixe



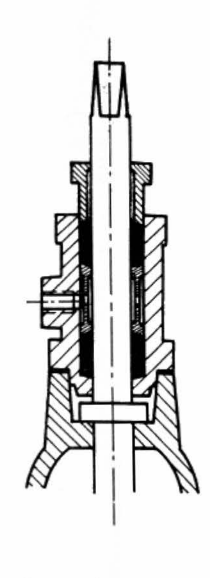
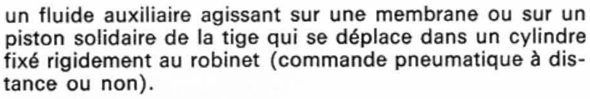


Fig. VIII-119

Dispositifs d'étanchéité hydraulique pour presse-étoupe de tige de robinet-vanne



un fluide auxiliaire agissant sur une membrane ou sur un piston solidaire de la tige qui se déplace dans un cylindre fixé rigidement au robinet (commande pneumatique à distance ou non).

3° *Indicateurs d'ouverture.* — Il est bon de pouvoir connaître à tout moment la position de l'obturateur par rapport à son siège, afin de pouvoir régler exactement un débit. Dans le cas des robinets à tige montante, cette position est donnée par le dépassement de la tige; mais quand le robinet est à tige fixe, il est nécessaire d'avoir recours à un indicateur d'ouverture, par exemple un écrou vissé sur la tige du robinet et immobilisé en rotation par une tige graduée (fig. VIII-118). Le pas utilisé devra être fin, pour réduire au minimum la course de cet index.

4° *Joints hydrauliques.* — Les tuyauteries destinées au vide exigent l'utilisation d'une robinetterie particulièrement étanche aux rentrées d'air extérieur, notamment au passage de la tige dans un presse-étoupe. Pour obtenir une étanchéité certaine, on aménage une cuvette ou une circulation de liquide autour de la tige, de façon à créer un joint hydraulique interdisant toute rentrée d'air (fig. VIII-119).

Remarque : lorsque les conditions d'étanchéité sont très sévères (vide élevé), même le presse-étoupe hydraulique ne donne plus une garantie suffisante. On emploie alors un soufflet (tuyau métallique souple sans soudure) assemblé par soudure autogène sur le chapeau et sur la tige du robinet, cette dernière devant être arrêtée en rotation. Cette disposition est également utilisée pour des fluides éminemment dangereux (industries chimiques et atomiques) ; dans ce cas, elle est complétée par un presse-étoupe ordinaire qui assure une sécurité en cas de fuite du soufflet.

3.11. Caractéristiques d'utilisation des robinets

1° *Désignation.* — Pour éviter toute imprécision dans la désignation d'un robinet, celle-ci doit comprendre tous les éléments suivants :

— type du robinet (robinet-vanne, à soupapes, etc.),
— matière,
— pression nominale (avec nature, température et pression du fluide),
— mode de raccordement (à brides, taraudés, à souder),
— diamètre nominal.

S'il y a lieu, des renseignements complémentaires pourront être donnés concernant l'usinage des brides (livrées percées, à emboîtement simple ou double) et les organes accessoires (commande spéciale, by-pass, joint hydraulique, indicateur d'ouverture).

2° *Matières.* — Le choix de la matière est guidé par la nature, la pression et la température du fluide à véhiculer.

Pour des pressions jusqu'à 16 bars et des températures ne dépassant pas 250 °C, on utilise le bronze ordinaire. La fonte, employée pour les grands diamètres nominaux, est réservée pour des pressions sensiblement plus faibles. L'acier moulé ordinaire est utilisé pour les pressions supérieures à 16 bars et des températures ne dépassant pas 350 °C; au-delà de cette température, il est nécessaire d'avoir recours à des aciers moulés spéciaux, dits réfractaires, avec additions de chrome, de nickel et de molybdène. L'acier forgé, allié ou non, est utilisé dans les mêmes conditions, mais souvent réservé aux petits orifices.

L'obturateur et le siège, ou leurs surfaces de contact, sont réalisés en métaux très durs (acier à 13 % de chrome, stellites).

Pour la robinetterie destinée à résister à des produits chimiques actifs ou à des eaux agressives, on a recours à tous les produits de la métallurgie pour obtenir une résistance suffisante à la corrosion par le fluide considéré.

On emploie, par exemple, les alliages légers, le plomb durci, l'ébonite, les matières plastiques, les bronzes spéciaux dits anti-acides, les cupro-nickels (*monel* et *inconel*), les fontes résistant aux acides (comme les fontes au nickel *Ni-resist*), les fontes au nickel-chrome et les ferro-silicium. La robinetterie pour produits chimiques peut également être réalisée avec des aciers moulés au chrome-nickel (aciers inoxydables 18/8). La protection peut être constituée par un revêtement réalisé sur un corps en acier ou en fonte, soit par voie électrolytique ou par projection (galvanisation, cadmiage, étamage, cuivrage), soit par collage ou peinture (caoutchouc, résines synthétiques, ébonite, téflon). Pour les fluides cryogéniques (air, azote, oxygène liquides), on utilise exclusivement des métaux non fragiles aux basses températures (aluminium, bronze, cupro-nickel, acier inoxydable 18/8 et acier Maraging à 18 % de nickel).

3° *Pression nominale.* — L'usage est maintenant fermement établi de fournir la robinetterie avec des brides conformes aux gabarits normalisés. Pour choisir un robinet, on devra donc le désigner par sa pression nominale, qui correspond à la pression maximale de service admissible dans le cas de l'eau froide. Pour une température plus élevée, on admet une pression de service décroissante avec la température. À titre d'exemple, le tableau ci-après indique les conditions généralement admises pour l'utilisation d'appareils en acier non allié. Pour des aciers alliés au chrome-molybdène, on peut admettre des pressions notablement plus élevées.

Pression nominale	PN 6	PN 10	PN 16	PN 25	PN 40	PN 64	PN 100
Pression d'épreuve en bars	10	16	25	40	60	96	150
Pression de service admissibles en bars :							
Jusqu'à							
160 °C	6	10	16	25	40	64	100
200 °C			14	22	37	60	93
250 °C			12	19	33	55	87
315 °C			9	16	28	49	80
400 °C			6	12	21	38	58
425 °C			5	10	18	34	52

DESSIN TECHNIQUE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

Le dessin technique est utilisé pour représenter les organes, les appareils ou les machines à construire ou à modifier. Dans la première phase, celle de la recherche, il permet aux ingénieurs, aux techniciens, aux dessinateurs, d'exprimer leurs projets sous une forme concrète.

Dans la seconde phase, celle de la fabrication, il permet aux techniciens du *bureau des méthodes* et des ateliers de réaliser la fabrication des pièces, le contrôle des formes et des dimensions, ainsi que le montage de la machine.



Bureau d'études (*UNIC*)

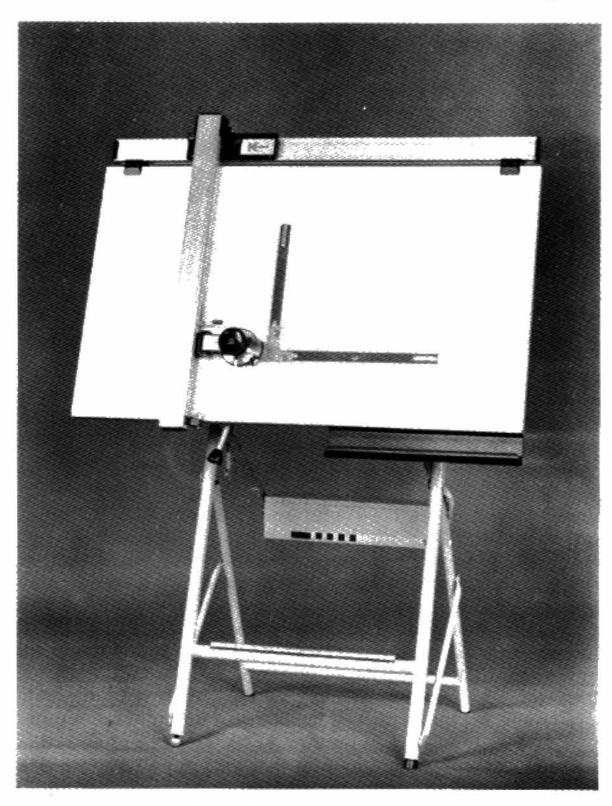


Fig. I-1 — Table à dessiner (*UNIC*)

1. DIFFÉRENTS TYPES DE DESSINS

— Différentes sortes de dessins doivent être distinguées ; elles correspondent aux diverses étapes de la réalisation.

1.1. Dessins de conception. — Ils représentent les premiers travaux du *bureau d'études* relatifs à un appareil nouveau ; on les appelle généralement *avant-projets* ; ils comportent souvent des notices de calcul, des diagrammes, des épures. Ils servent à l'exécution des dessins suivants, plus complets.

1.2. Dessins d'ensemble. — Ils représentent l'ensemble de l'appareil ou, s'il s'agit d'une machine importante, un sous-ensemble. Ils permettent de déterminer exactement les formes et les dimensions de chacune des pièces qui les composent, ainsi que les liaisons mécaniques de chaque pièce ou organe avec les pièces ou organes voisins. Ils précèdent immédiatement les dessins de définition de produit fini, ou dessins de détail.

1.3. Dessins de définition de produit fini. — Ils sont établis par le *bureau d'études* et doivent définir complètement, et de manière univoque, les formes et les dimensions de chaque pièce. Ils comportent aussi toutes les indications pour que la pièce puisse remplir sa fonction : matériau, traitement thermique éventuel, états de surfaces, tolérances dimensionnelles, tolérances de formes. Ces dessins doivent être suivis de façon rigoureuse par les services de fabrication et de contrôle. Ils ont la valeur d'un contrat liant tous les services concernés par la réalisation de l'appareil.

1.4. Dessins de fabrication. — Ils sont établis par le *bureau des méthodes* et les services de préparation du travail à partir des dessins de définition de produit fini, d'après le mode de fabrication choisi et la gamme d'usinage. On peut distinguer diverses catégories.

1° *Les dessins d'opération* qui donnent les indications et les renseignements nécessaires à l'exécution d'une seule phase de la gamme d'usinage.

2° *Les dessins d'assemblage ou de montage* qui doivent comporter uniquement les indications nécessaires au montage de l'appareil et quelques cotes caractéristiques.

3° *Les dessins de vérification ou de contrôle* qui permettent le contrôle des pièces.

1.5. Schémas. — Ils indiquent, au moyen d'un tracé simplifié, les liaisons entre les différents organes ou appareils d'une installation, en vue d'en effectuer le montage correct. Ces dessins utilisent des symboles qui correspondent à une représentation simplifiée de divers appareils utilisés dans les industries concernées. Exemple : installations de chauffage, installations électriques.

1.6. Croquis cotés. — Ils sont exécutés à vue, sans instruments de dessin et souvent réalisés d'après la pièce dont on relève ainsi rapidement les formes et les dimensions. On utilise aussi le croquis en perspective pour aider à résoudre un problème technique, à tous les stades de la production.

2. MATÉRIEL DU DESSINATEUR

Le dessinateur doit posséder les instruments suivants :

2.1. Planche à dessin. — Faite en bois tendre bien raboté, elle est encadrée de bois dur parfaitement dressé, pour permettre le mouvement du té. Il est préférable de n'employer que des planches encadrées de bois dur sur les quatre côtés. Les dimensions sont variables et subordonnées à l'importance des dessins à exécuter. La figure I-1 représente un modèle de *table à dessiner* moderne. Outre son équilibrage, sa mobilité en hauteur et son inclinaison variable de 0 à 90°, elle a l'avantage de pivoter sur 360° et de coulisser latéralement. Elle est équipée d'un appareil à dessiner monorail très commode qui lui assure, par l'utilisation de roulements à billes réglables, un guidage horizontal et vertical d'une grande précision. L'équilibrage est réalisé par un système oléo-pneumatique réglable. La table à dessiner équipée d'un appareil à dessiner qui permet tous les déplacements possibles aux deux règles graduées réunit en une seule pièce, le té, l'équerre et le rapporteur. Elle facilite beaucoup les tracés et augmente considérablement la vitesse d'exécution des dessins.

2.2. Double ou triple-décimètre. — Il est gradué en millimètres ou en demi-millimètres.

2.3. Crayons. — Le dessinateur utilise des crayons durs (numéros 3 ou 4). Pour les croquis, la mine doit être taillée en forme de cône ou de pyramide ; pour les dessins au net, il faut lui donner deux méplats. On utilise maintenant, de plus en plus, des porte-mines à mines spéciales, plates, de l'épaisseur du trait et qui ne nécessitent aucun affûtage.

2.4. Gommes. — Une gomme douce et une gomme dure sont nécessaires.

2.5. Règles plates et tés. — On utilise souvent le té (fig. I-2), règle plate en bois de poirier ou en matière plastique, d'une longueur égale à celle de la planche, et dont une extrémité porte une autre règle assemblée à angle droit ; l'ensemble forme un T dont la tête est plus épaisse

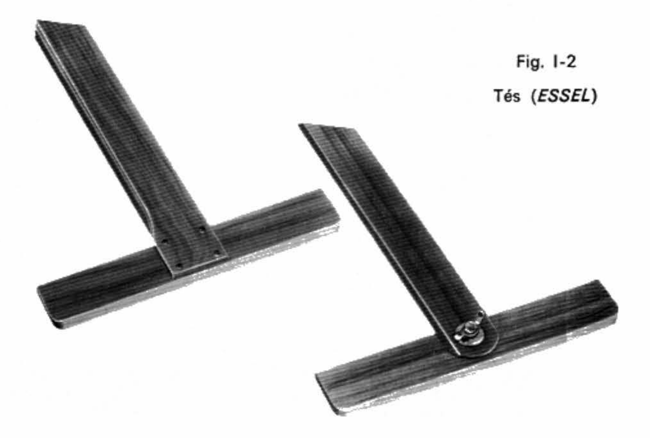


Fig. I-2
Tés (*ESSEL*)

pour obtenir un bon appui sur le bord de la planche, et permettre, quand on la glisse, de tracer des traits parfaitement parallèles. Dans certains modèles (fig. I-3) la tête est mobile et permet d'incliner la règle pour tracer des lignes obliques par rapport au bord de la planche.



Fig. I-3

Té à tête amovible (*ESSEL*)

Vérification d'une règle. — Pour vérifier une règle, on trace deux points *A* et *B* sur une feuille de papier et l'on fait passer la règle par ces deux points. On trace *AB* puis, après avoir fait tourner la règle de 180°, on voit s'il y a coïncidence. On vérifie également le parallélisme des bords de la règle.

Remarque: Pendant l'exécution d'un dessin, on ne doit se servir du té que d'un seul côté de la planche pour éviter les erreurs dues au manque possible de parallélisme des deux côtés de la planche à dessiner et pour remédier à un faux équerrage éventuel du té.

2.6. Équerres. — Constituée par une plaquette mince dressée sur deux faces, dont la forme est celle d'un triangle rectangle ajouré (pour en faciliter le maniement), l'équerre est exécutée en bois de poirier ou en matière plastique. On se sert souvent de deux équerres: l'équerre à 45° dont les angles aigus mesurent 45° et l'équerre à 60° dont les angles aigus mesurent l'un 60° et l'autre 30° (fig. I-4). Les équerres servent à tracer les lignes droites concurremment avec le té et suffisent à tous les besoins des principaux tracés géométriques rectilignes.

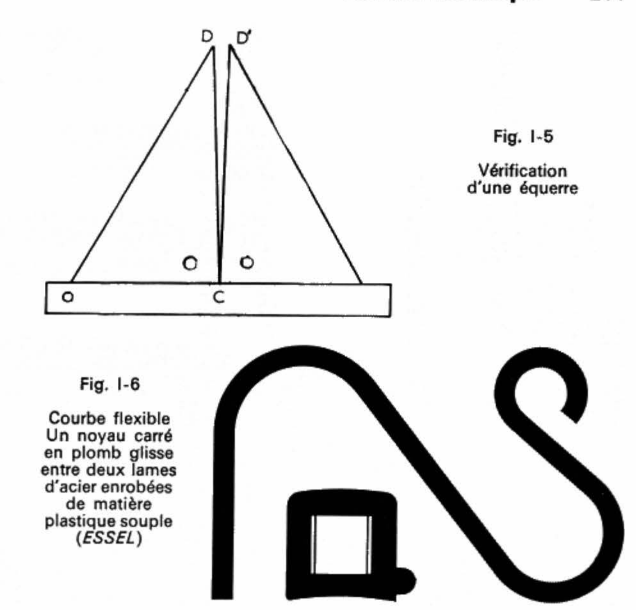


Fig. I-5

Vérification d'une équerre

Fig. I-6

Courbe flexible Un noyau carré en plomb glisse entre deux lames d'acier enrobées de matière plastique souple (*ESSEL*)

2.7. Boîte de compas. — Elle se compose d'un certain nombre d'instruments (V. page suivante).

1° *Le compas* à deux branches en laiton dur ou en maillechort, avec articulation d'acier qui permet une ouverture variable. L'une des branches porte une aiguille d'acier, l'autre permet de monter soit une mine de crayon, soit un tire-lignes. Il sert au tracé des cercles ou des arcs de cercles. Le compas à pointes sèches a deux pointes d'acier; il sert à porter très exactement sur le dessin les dimensions préalablement relevées sur un double-décimètre.

2° *Le compas pincette*, dit *balustre* dont l'ouverture est réglable par une vis; il sert à tracer des cercles ou arcs de faibles rayons (de 1 à 40 mm environ). Au-dessous d'un millimètre de rayon, on utilise le *compas à pompe*, conçu pour le tracé des très petits cercles; le corps du compas tourne autour d'une longue aiguille fixe.

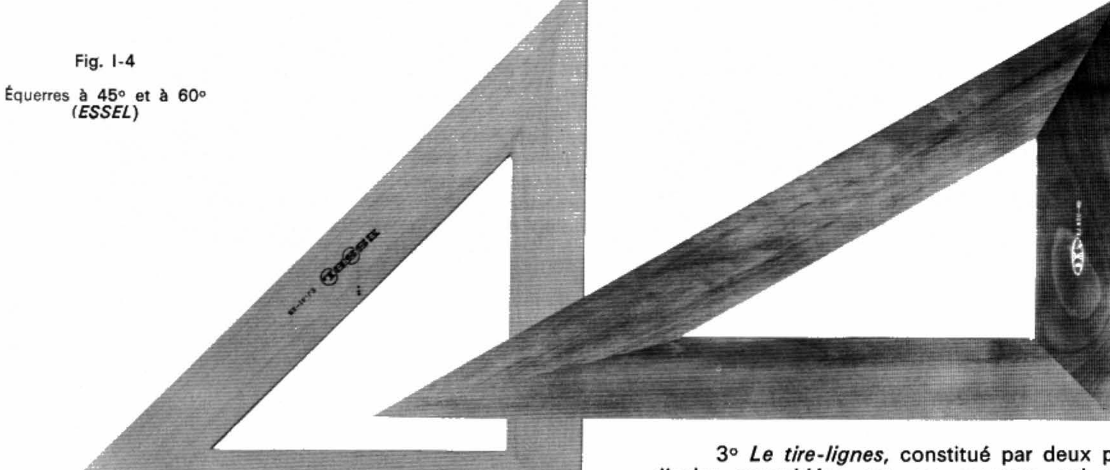


Fig. I-4

Équerres à 45° et à 60° (*ESSEL*)

Remarque: Il existe également des *pistolets et des courbes flexibles* (fig. I-6) qui permettent le tracé de courbes de différentes formes.

Vérification d'une équerre. — Pour vérifier une équerre on la place sur une règle exacte, puis en *C* on élève la perpendiculaire *CD* (fig. I-5). On retourne l'équerre et l'on trace la droite *CD'*. Si l'équerre est juste, les deux droites *CD* et *CD'* doivent coïncider. Pour les équerres à 45°, on vérifie d'abord que le triangle est bien rectangle, puis que les deux côtés de l'angle droit sont égaux.

3° *Le tire-lignes*, constitué par deux petites lames d'acier assemblées sur une monture qui peuvent être plus ou moins rapprochées par une vis de serrage: il sert au tracé à l'encre. L'encre de Chine est introduite entre les deux branches dont l'écartement correspond à la largeur du trait choisi. Le tire-lignes monté sur manche permet le tracé des lignes droites; adapté à un compas ou à un compas-pincette, il sert au tracé de cercles ou d'arcs de cercles. Il doit toujours être tenu presque verticalement et légèrement incliné vers le côté où se dirige la main et les deux becs doivent parfaitement porter sur le papier. Pour tracer les lignes droites on appuie légèrement le tire-lignes sur la règle ou sur l'équerre, ou suivant leur arête.

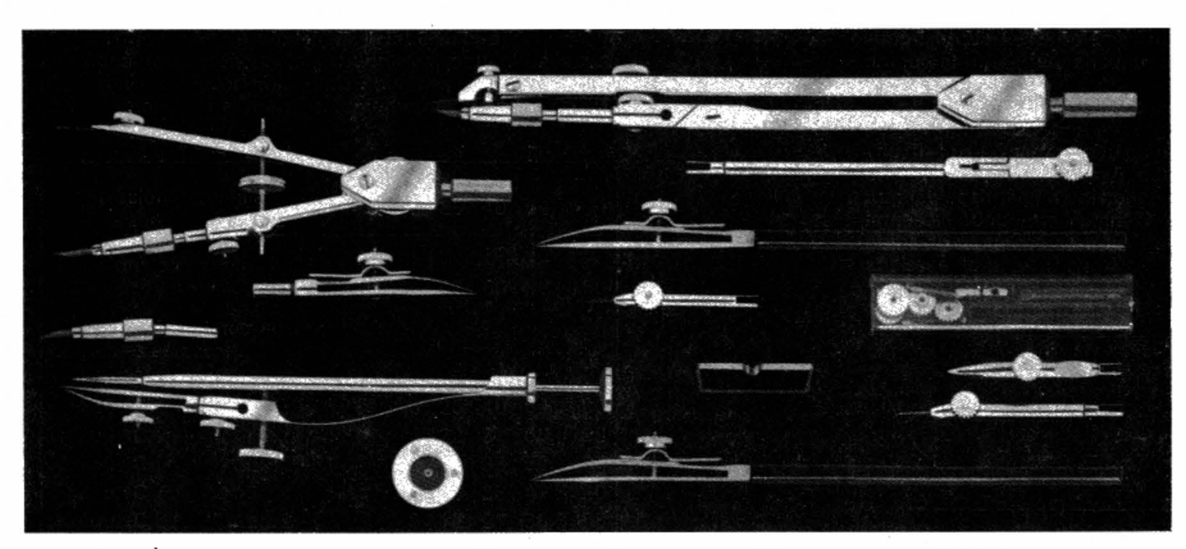
Dans une boîte de compas on trouve également des pointes de rechange, une rallonge et d'autres accessoires utiles pour dessiner. Depuis quelques années pour rempla-

Compas

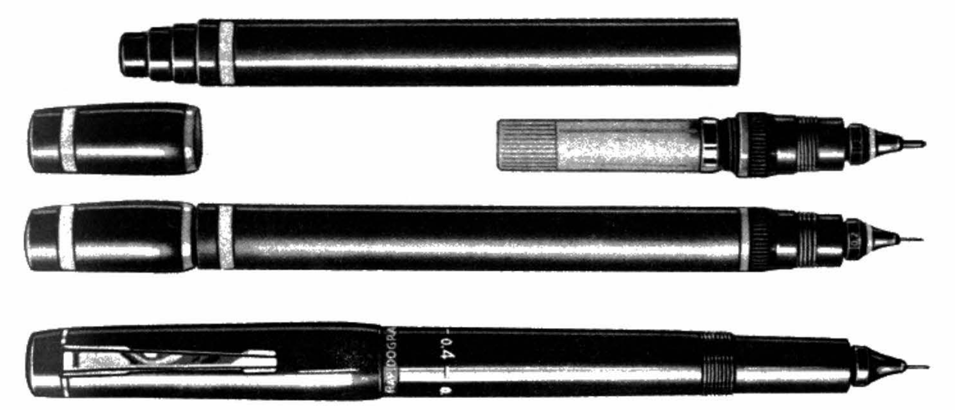
Compas balustre
(*ESSEL*)

Compas à pompe

Tire-lignes



Boîte à compas (*ESSEL*)



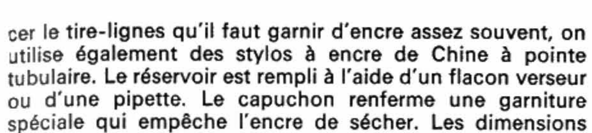


Fig. I-7

Système « Variant » et stylo « Rapidograph » (*Éts Angalis*)

cer le tire-lignes qu'il faut garnir d'encre assez souvent, on utilise également des stylos à encre de Chine à pointe tubulaire. Le réservoir est rempli à l'aide d'un flacon verseur ou d'une pipette. Le capuchon renferme une garniture spéciale qui empêche l'encre de sécher. Les dimensions des pointes sont repérées au moyen de traits de couleurs gravés, d'une part, sur le capuchon et, d'autre part, sur la pointe.

Dans de nombreux cas, ces instruments nouveaux permettent un gain de temps appréciable dans l'exécution des dessins (fig. I-7).

2.8. Papiers à dessin. — Divers papiers sont utilisés:

1° Le *Canson en feuilles* convient aux dessins de formats normalisés: 210 × 297 ou A4 — 420 × 297 ou A3 — 420 × 594 ou A2 — 840 × 594 ou A1 et 1020 × 720 ou « Grand Aigle ».

2° Le *Canson en rouleau,* coupé à la longueur demandée, permet les dessins au grand format normalisé de 1 188 × 840, ou les dessins spéciaux pour lesquels les formats normalisés sont insuffisants.

3° Le *papier fin transparent ou papier calque,* en feuilles aux formats normalisés ou en rouleau de 1100 mm de hauteur, coupé à la demande. Les dessins exécutés sur ce papier servent aussi de clichés pour une duplication très économique par diazotypie (procédé à l'ammoniaque) (V. chap. 6).

CHAPITRE II

CONSTRUCTIONS GÉOMÉTRIQUES

1. TRACÉS DES RACCORDEMENTS

Le problème consiste, en général, à raccorder par un arc de cercle de rayon déterminé, soit deux droites, soit une droite et un cercle, soit deux cercles. La solution consiste à trouver le centre du cercle de raccordement, ainsi que les points de contact (ou de tangence) avec les éléments donnés afin d'effectuer un tracé précis. On donnera ci-après la solution des problèmes de raccordement qui correspondent aux cas les plus courants rencontrés dans la représentation des pièces de machines. Dans un souci de simplification on suppose que les problèmes posés admettent une solution unique et on ne fera aucune discussion géométrique.

1° Tracer un arc de cercle de rayon donné R, passant par un point M donné et tangent à une droite donnée AB (fig. II-1). — *Solution :* Du point M pris comme centre, tracer un arc de cercle de rayon R, puis tracer la parallèle à la droite donnée et située à la distance $d = R$ de celle-ci. Ces deux lignes se coupent au point O, centre du cercle cherché. Le point de tangence se trouve au pied de la perpendiculaire abaissée du point O sur AB.

2° Tracer un arc de cercle de rayon donné R, passant par un point M et tangent à une circonférence de centre O_1 et de rayon R_1 (fig. II-2). — *Solution :* Du point M pris comme centre, tracer un arc de cercle de rayon R, puis tracer le cercle de centre O_1 et de rayon égal à la somme $R + R_1$. Ces deux lignes se coupent en O qui est le centre de l'arc cherché. Le point de tangence H se trouve à l'intersection de la ligne des centres OO_1 avec le cercle donné O_1 (R_1).

3° Tracer un arc de cercle de rayon donné R, tangent à deux droites données AB et CD (fig. II-3). — *Solution :* Tracer la parallèle à chacune des droites AB et CD située à la distance $d = R$ de celles-ci. Elles se coupent en un point O. Les points de tangence H et H' sont situés au pied des perpendiculaires abaissées du point O sur chacune des droites données.

4° Tracer un arc de cercle de rayon R, tangent à une droite AB et à une circonférence de centre O_1 et de rayon R_1 (fig. II-4). — *Solution :* Tracer le cercle de centre O_1 et de rayon égal à la somme $R + R_1$, puis la parallèle à la droite donnée à la distance $d = R$ de celle-ci. On obtient le centre O cherché.

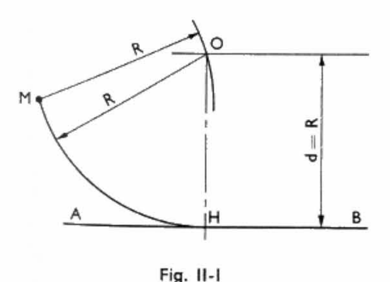


Fig. II-1

Fig. II-2

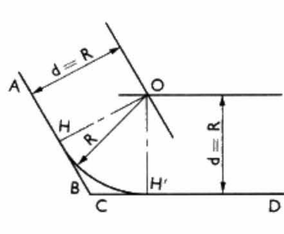


Fig. II-3

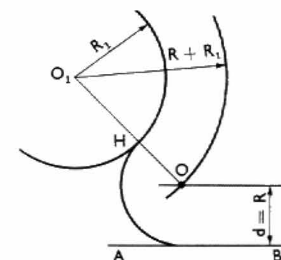


Fig. II-4

5° Tracer un arc de cercle de rayon R, tangent à deux cercles donnés O_1 (R_1) et O_2 (R_2) (fig. II-5).

a) Les circonférences données sont tangentes extérieurement à l'arc de raccordement. — *Solution :* Tracer les circonférences $O_1(R_1 + R)$ et $O_2(R_2 + R)$; elles se coupent au point O. Les points de tangence sont situés sur les lignes des centres OO_1 et OO_2.

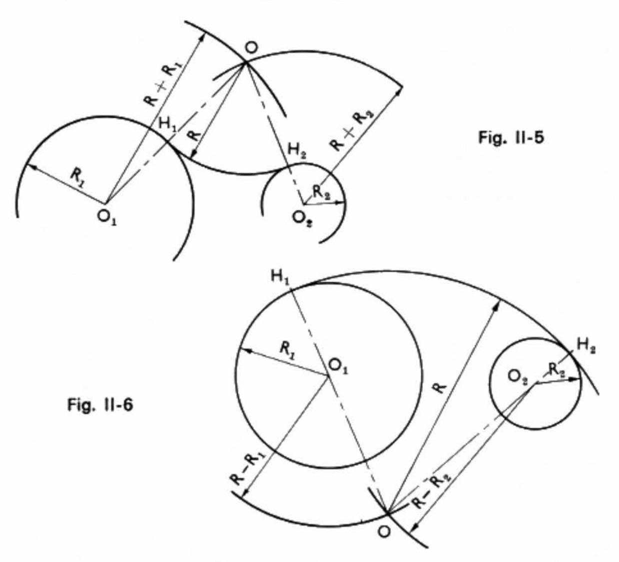


Fig. II-5

Fig. II-6

b) Les circonférences données sont tangentes intérieurement à l'arc de raccordement (fig. II-6). — *Solution :* Tracer les cercles des centres O_1 et O_2 et ayant pour rayons respectifs $R - R_1$ et $R - R_2$. On obtient le centre O cherché, à l'intersection de ces deux lignes. Les points de raccordement H_1 et H_2 sont situés respectivement sur les lignes des centres OO_1 et OO_2.

2. TRACÉS DES POLYGONES RÉGULIERS

Un polygone régulier ayant tous ses côtés égaux et tous ses angles égaux est toujours inscriptible dans une circonférence.

1° Tracer un hexagone inscrit ou diviser une circonférence en six parties égales (fig. II-7). — *Solution :* Dans le cercle donné de rayon R, tracer un diamètre AD, puis de A et D comme centres, tracer les arcs de cercle de rayon R qui coupent le cercle suivant les points BF et EC cherchés. Les points A, B, E, D, C et F sont les sommets de l'hexagone.

Remarque : Chaque côté de l'hexagone a une longueur égale à R.

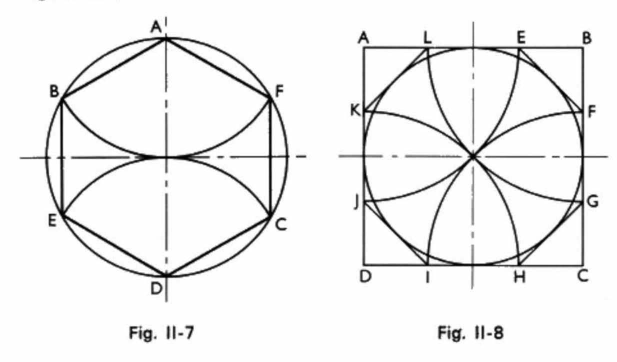


Fig. II-7

Fig. II-8

2° Tracer un octogone régulier circonscrit à un cercle donné (fig. II-8). — *Solution :* Tracer tout d'abord un carré circonscrit au cercle donné ; ensuite, des sommets *ABCD* pris pour centres, tracer des arcs de cercle de rayon égal à la demi-diagonale du carré. Les points d'intersection *EFGHIJKL* obtenus avec les côtés du carré circonscrit *ABCD* sont les sommets d'un octogone.

3° Tracer un pentagone inscrit dans un cercle donné (fig. II-9). — *Solution :* Tracer les deux diamètres perpendiculaires AD et EF. Prendre le milieu I de OF. Tracer l'arc de cercle de centre I et de rayon IA qui coupe le diamètre EF au point G. Le segment AG donne la mesure du côté du pentagone inscrit *MANPQ*.

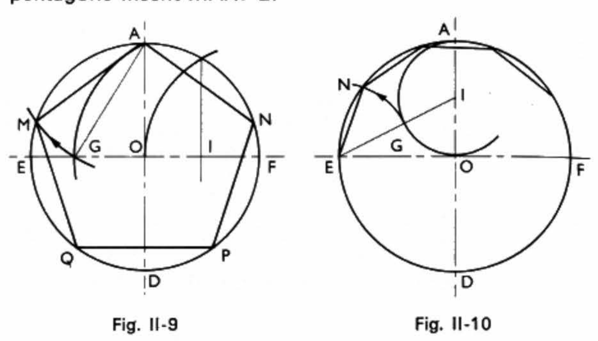


Fig. II-9

Fig. II-10

4° Tracer un décagone régulier inscrit dans un cercle donné (fig. II-10). — *Solution :* Tracer les deux diamètres perpendiculaires AD et EF. Prendre le milieu I de AO. Tracer ensuite l'arc de centre I et de rayon IO qui coupe le segment EI au point G. Le segment EG donne la mesure du côté du décagone cherché.

3. TRACÉS DE COURBES PARTICULIÈRES

3.1. Tracé de l'anse de panier (fig. II-11). — On donne les deux demi-axes OA et OB. Tracer l'arc de cercle de centre O et de rayon OC qui coupe OB au point D. Tracer l'arc de cercle de centre B et de rayon BD qui coupe le segment BC au point G. Tracer la médiatrice du segment CG.

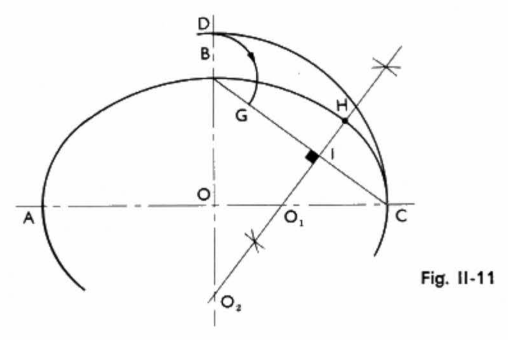


Fig. II-11

Cette dernière droite coupe l'axe horizontal en O_1 et l'axe vertical en O_2 qui sont les centres des cercles (O_1, O_1C) et (O_2, O_2B) se raccordant au point de tangence H qui se trouve sur la ligne des centres O_1 O_2. On obtient ainsi la portion *BHC*.

3.2. Tracé de la spirale d'Archimède (fig. II-12). — La spirale d'Archimède est définie par le pas (distance OP sur la figure) et par le sens d'enroulement. Tracer la

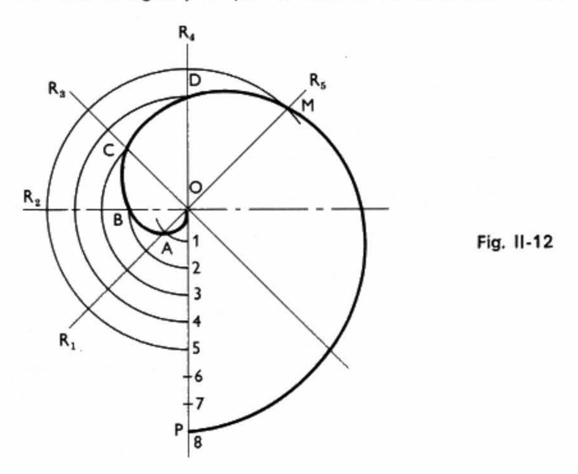


Fig. II-12

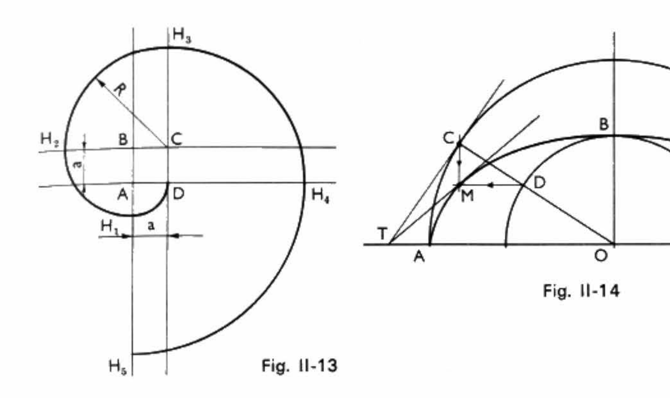


Fig. II-14

Fig. II-13

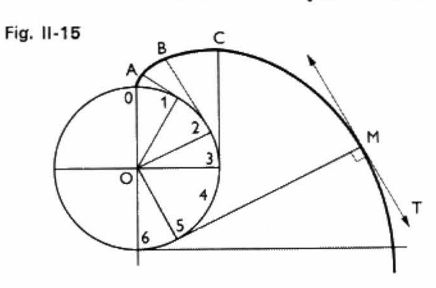


Fig. II-15

spirale en divisant le pas en un certain nombre de parties égales (8 sur la figure) et en divisant le plan autour du centre O en un même nombre de parties égales. Porter sur les rayons OR_1, OR_2, OR_3, etc. les distances O-1, O-2, O-3, etc. et joindre les points obtenus O-A-B-C-D-M, etc.

Remarque : On peut faire un tracé approché au compas, au moyen d'arcs de cercles raccordés, et dénommé spirale à quatre centres (fig. II-13). On part d'un carré dont le côté a est égal au quart du pas de la spirale. Ici, le carré $ABCD$ est utilisé par ses quatre sommets pour tracer les arcs de cercles successifs se raccordant aux points H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, etc. (premier cercle : centre A et rayon a ; second cercle : centre B et rayon BH_1 ; troisième cercle : centre C et rayon CH_2, etc.).

3.3. Tracé de l'ellipse (fig. II-14). — Divers tracés existent. Celui que l'on présente ici est appelé « tracé par réduction des ordonnées ». On donne les deux demi-axes OA et OB. Tracer le cercle de centre O et de rayon OA, puis le cercle de même centre et de rayon OB. Par un point quelconque C de la grande circonférence mener le rayon CO qui coupe le cercle intérieur au point D. Par C mener une perpendiculaire à OA et par D une parallèle à OA. Ces deux droites se coupent en M, point cherché. On peut tracer la tangente à l'ellipse à partir de la tangente au cercle au point C : on trace CT qui coupe le rayon OA, puis TM tangente à l'ellipse au point M.

3.4. Tracé de la développante de cercle (fig. II-15). — Ce tracé est adopté pour définir la forme du profil des dents d'engrenages et remplace les épicycloïdes utilisées autrefois. Une développante de cercle est engendrée par le mouvement d'un point fixe d'une droite qui roule sans glisser sur un cercle fixe, appelé généralement *cercle de base*. Pour la tracer, diviser la circonférence en parties égales, tracer les tangentes aux points de division et porter sur chacune d'elles des segments tels que 1-A = arc 01 ; 2-B = arc 02 ; 3-C = arc 03 ; etc. Joindre les points 0ABC, etc.
Remarque : La tangente MT en un point quelconque M est facile à tracer puisqu'elle est perpendiculaire à la tangente au cercle de base, au point de division correspondant.

3.5. Tracé de la cycloïde (fig. II-16). — La cycloïde est la courbe engendrée par un point A d'une circonférence de centre O et de rayon R qui roule sans glisser sur une droite XX'. Pour tracer la cycloïde on porte sur la droite XX' une longueur AB égale à la longueur de la circonférence $2\pi R$ et on divise cette longueur en parties égales (12, par exemple). On divise de même, à partir du point A, la circonférence (O, R) en 12 parties égales. On mène par le centre O de la circonférence une parallèle à AB qui rencontre les perpendiculaires à AB élevées des points 1, 2, 3, etc. aux points O_1, O_2, O_3, etc. De O_1, O_2, O_3, etc. comme centres, on trace les circonférences de rayon R. Les points de rencontre M_1, M_2, M_3, etc. des cercles O_1, O_2, O_3, etc. avec les parallèles à AB issues des points 1′, 2′, 3′, etc. sont des points de la cycloïde. Il suffit de joindre par une courbe continue les points M_1, M_2, M_3, etc. pour obtenir la courbe complète.
Remarque : La tangente en M_4 à la cycloïde est perpendiculaire au point M_4 au segment M_4-4.

3.6. Tracé de l'épicycloïde (fig. II-17). — L'épicycloïde est une courbe engendrée par un point d'une circonférence (O, R) (roulette) qui roule sans glisser sur une circonférence fixe (O_1, R_1) (cercle de base) et à l'extérieur

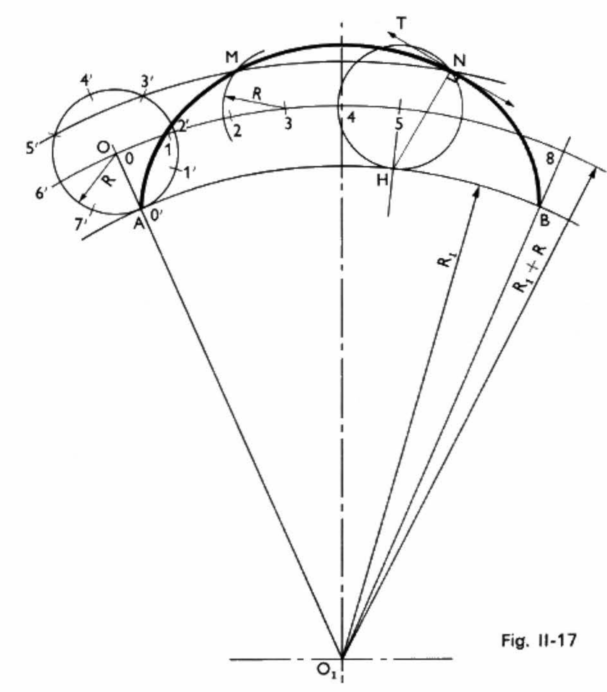


Fig. II-17

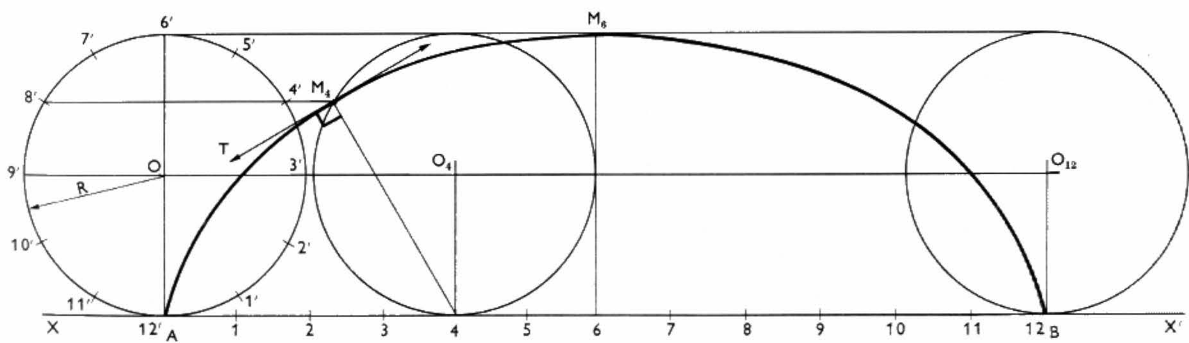


Fig. II-16 — Pour simplifier la figure, seuls les détails d'obtention du point M_4 ont été représentés

de celle-ci. Pour tracer l'épicycloïde, construire sur le cercle (O_1, R_1) l'arc $AB = 2\pi R$. L'angle au centre correspondant est $\widehat{AO_1B} = 360° \times \dfrac{R}{R_1}$. Tracer ensuite l'arc de cercle de centre O_1 et de rayon $R + R_1$. Diviser cet arc ainsi que le cercle de rayon R en un même nombre de parties égales (8, par exemple). Tracer les arcs de cercles de centre O_1 qui passent par les points de division 1′, 2′, 3′, etc. du cercle de centre O. Par les points 1, 2, 3, 4, 5, etc. tracer les cercles de rayon R. Ils coupent les cercles précédents en des points, M et N, qui appartiennent à la courbe cherchée. Il suffit de joindre les points obtenus.

Remarque : La tangente NT en un point de la courbe est perpendiculaire au segment HN (cinquième position de la roulette dans le cas de la figure).

3.7. Tracé de l'hypocycloïde (fig. II-18). — La roulette (O, R) roule sans glisser sur le cercle de base (O_1, R_1), mais à l'intérieur de celui-ci. Le tracé se fait de façon analogue au tracé de l'épicycloïde.

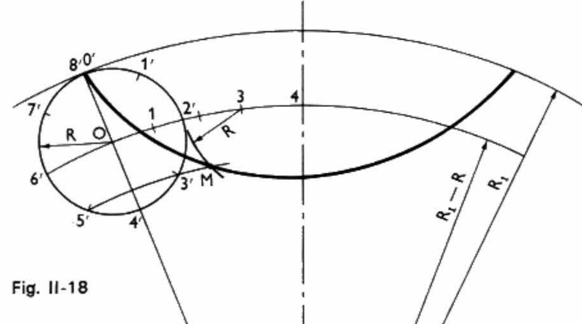


Fig. II-18

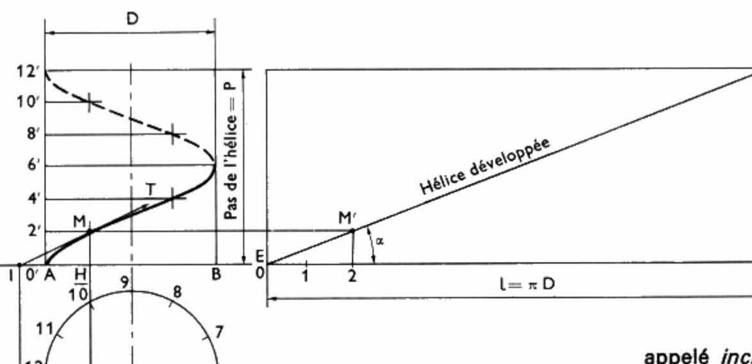


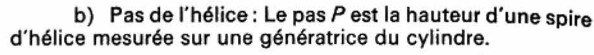
Fig. II-19

3.8. Tracé de l'hélice (fig. II-19). — L'hélice est une courbe engendrée par un point M se déplaçant sur un cylindre O de telle manière que l'ordonnée soit à chaque instant proportionnelle à l'abscisse curviligne.

1° *Définitions :*

a) Sens d'une hélice : L'hélice est « à droite » si un observateur placé à l'extérieur du cylindre, et parallèlement à l'axe de celui-ci, voit l'hélice monter de la gauche vers la droite. Elle est « à gauche » dans le cas contraire.

b) Pas de l'hélice : Le pas P est la hauteur d'une spire d'hélice mesurée sur une génératrice du cylindre.



c) Longueur d'une spire d'hélice : $L = \sqrt{P^2 + \pi^2 D^2}$ si l'on désigne par D le diamètre du cylindre.

d) Développement : Le développement d'une hélice est une droite EC. Avec l'horizontale EF elle fait un angle α, appelé *inclinaison* de l'hélice, dont la valeur est définie par la relation suivante $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{P}{\pi D}$.

2° *Construction de l'hélice :* Diviser le cercle de centre O et de diamètre D en 12 parties égales, par exemple. Diviser le pas en un même nombre de parties égales. Tenir compte du sens de l'enroulement (sens inverse des aiguilles d'une montre pour une hélice à droite). Tracer les lignes de rappel qui correspondent aux mêmes points de division. La construction est faite sur la figure pour les points 2 et 2′ et l'on obtient le point M. Pour tracer la tangente à l'hélice au point M, porter sur la tangente au cercle (O, R) menée au point 2, une longueur 2-J égale à la longueur de l'arc $\widehat{O\text{-}2}$. Tracer ensuite la ligne de rappel du point J, laquelle rencontre le diamètre AB au point I. La tangente au point M est la droite IMT.

CHAPITRE III

REPRÉSENTATION EN PERSPECTIVE

Alors que les projections orthogonales habituelles ne présentent que des vues séparées, en nombre variable, d'une même pièce, les représentations par perspectives normalisées donnent une image complémentaire des pièces qui permet de bien se rendre compte de leurs formes générales.

On n'utilise pas souvent le dessin en perspective car il est plus difficile à établir, notamment à cause du tracé des cercles ; mais il rend de grands services, en particulier dans les figures de catalogues de pièces détachées, dans les dessins publicitaires et dans de nombreuses autres utilisations. On distingue les perspectives cavalières et axonométriques, toutes deux normalisées.

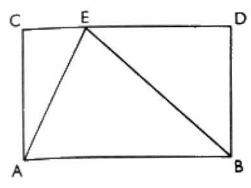
1. PERSPECTIVES CAVALIÈRES

C'est une projection oblique de la pièce qui est placée de façon que deux de ses axes principaux soient parallèles au plan de projection.

1.1. Principes de représentation. — Les figures contenues dans des plans parallèles au plan de projection se projettent en vraie grandeur (s'il s'agit d'une droite ou d'un cercle, ils se projetteront en vraie grandeur, donc sans déformation). Les arêtes perpendiculaires au plan de projection se projettent suivant des arêtes parallèles, appelées « fuyantes ». Avec l'horizontale elles forment un angle α, appelé « angle des fuyantes » choisi pour donner la repré-

sentation la plus claire. En général $\alpha = 30°$, $45°$ ou $60°$ (Norme NF E.04-108). La longueur des fuyantes est réduite dans un certain rapport k qui dépend de l'angle des fuyantes (pour $\alpha = 45°$, on prend généralement $k = 0{,}5$). Un dessin en perspective est caractérisé finalement par α et par k qui sont les « éléments de réduction » pour la représentation.

1° *Représentation d'un rectangle et d'un triangle* (fig. III-1). — Adoptons comme éléments de réduction $\alpha = 45°$ et $k = 0{,}5$. La perspective du rectangle *ABCD*



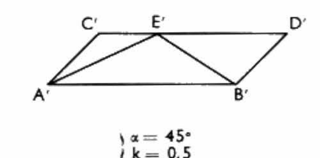
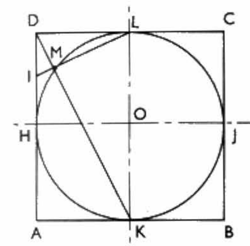


Fig. III-1

est le parallélogramme *A'B'C'D'*, dans lequel les côtés *AB* et *CD* se projettent en vraie grandeur, tandis que les côtés *AC* et *BD*, qui sont perpendiculaires au plan de projection, se projettent suivant les fuyantes *A'C'* et *B'D'*, réduites dans le rapport 0,5. La perspective du triangle *AEB* est *A'E'B'*, construite en portant $C'E' = CE$ sur le coté *C'D'*.

2° *Représentation d'une circonférence* (fig. III-2). — La perspective est une ellipse. Tracer tout d'abord le carré *ABCD* circonscrit à la circonférence. Tracer ensuite la perspective de ce carré *A'B'C'D'* qui est un parallélogramme. Les



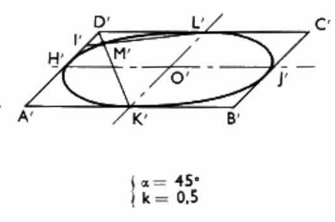


Fig. III-2

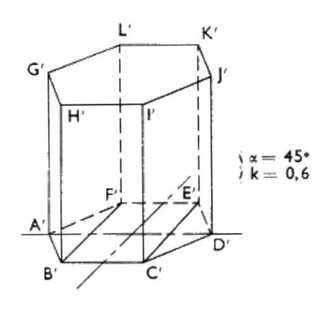
médiatrices du carré (*HJ* et *KL*) seront en perspective *H'J'* et *K'L'*, parallèles aux côtés. L'ellipse passe par les points *H'K'J'L'*, et est tangente en ces points aux côtés du parallélogramme, projection du carré *ABCD*. Pour trouver un point *M'* de l'ellipse, on peut tracer *LI* passant par le milieu *I* du segment *DH*, puis sur la perspective. *L'I'* passant par le milieu *I'* de *D'H'*. Joindre ensuite *D'K'* projection de *DK*. On obtient *M'* à l'intersection de *L'I'* et de *D'K'*.

1.2. Perspectives cavalières de quelques solides

1° *Prisme à base hexagonale* (fig. III-3). — On trace la perspective de l'hexagone de base *A'B'C'D'E'F'*, en appliquant les principes indiqués au paragraphe 1.1. On



Fig. III-3



trace ensuite les arêtes latérales, en vraie grandeur, *A'G'*, *B'H'*, *C'I'*, etc. Les côtés de la base supérieure *G'H'I'J'K'L'* sont parallèles à ceux de la base inférieure (les éléments de réduction sont indiqués sur la figure).

2° *Cylindre droit à base circulaire* (fig. III-4). — On fait le tracé des deux cercles des bases, parallèles, puis

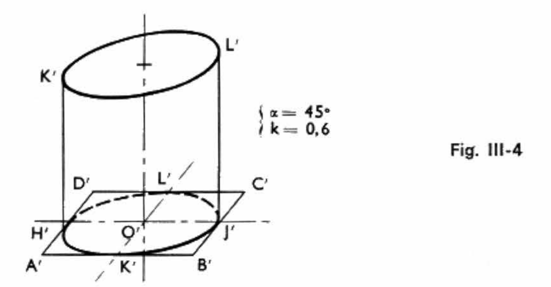


Fig. III-4

des génératrices du contour apparent du cylindre, tangentes aux ellipses des bases *H'K'* et *J'L'* (V. le tracé de la perspective d'une circonférence, au paragraphe précédent).

Remarque : Dans la mesure du possible, le dessin en perspective comporte le maximum de cercles dans des plans frontaux, afin que leurs projections soient non pas des ellipses, mais des circonférences égales à celles de l'objet, donc faciles à tracer au compas.

2. PERSPECTIVES AXONOMÉTRIQUES

(d'après NF E. 04-108)

C'est une projection orthogonale de la pièce, sur un plan de projection oblique, défini par les angles que font entre elles, les trois projections sur ce plan des arêtes concourantes *OA*, *OB*, *OC*, du cube de référence (indiquées en trait fort sur la figure III-5). La projection est dite *isométrique* si les angles α, β, γ sont tous égaux. La projection est dite *trimétrique* si ces angles sont tous différents. Elle est dite *dimétrique* si deux seulement d'entre eux sont égaux.

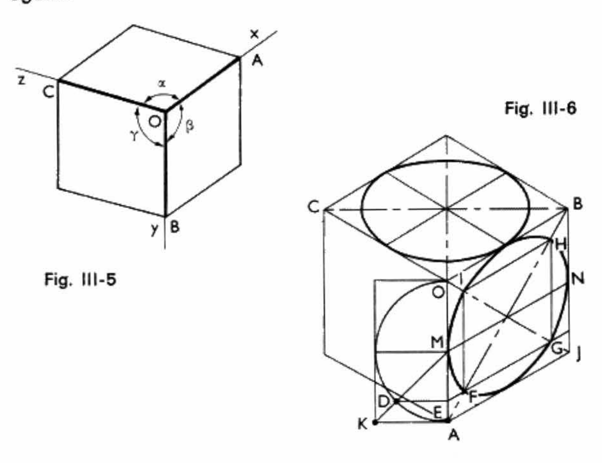


Fig. III-5

Fig. III-6

2.1. Principes de représentation.

— Une droite de la pièce, qui est parallèle à une arête du cube de référence, se projette de la même manière que l'arête correspondante. Un cercle situé dans un plan parallèle à une face du cube de référence, se projette de la même manière que le cercle appartenant à la face du cube de référence.

2.2. Perspectives isométriques

(fig. III-6). — Le tracé est relativement simple car dans ce cas $\alpha = \beta = \gamma = 120°$. Les cercles situés sur les trois faces du cube de référence se projettent suivant des ellipses égales. De plus, chacun des grands axes des ellipses est perpendiculaire à une arête du cube. Par exemple, sur la figure III-6, *AB* est perpendiculaire à *OC*. Si l'on désigne par *a* la longueur du côté du cube de référence, les côtés projetés *OA*, *OB* et *OC* sont égaux à 0,82 *a*, les grands axes des ellipses à *a*, et les petits axes à 0,58 *a*. On peut obtenir les points *F,G,H,I* situés sur les axes de l'ellipse, au moyen du tracé donné par la figure III-6, à partir de la diagonale *MK*, qui coupe le cercle de centre *M* au point *D*. Mener *DE* parallèle à *KA*, puis la parallèle à l'arête *OB*, menée par le point *E*. On obtient le point *F* avec la diagonale *AB* et le point *G* avec la deuxième diagonale *OJ*. Les points *H* et *I* se déterminent ensuite au moyen de parallèles.

CHAPITRE IV

CONVENTIONS ET REPRÉSENTATION NORMALISÉE

1. PRÉSENTATION; ÉCRITURES NORMALISÉES; TRAITS; ÉCHELLES

1.1. Présentation des dessins industriels

1° Les formats utilisés sont désignés au moyen de la lettre *A* suivie d'un chiffre : A_0, A_1, A_2, etc. Le format A_0 est le format de base; ses dimensions sont les suivantes : 840 × 1 188 (en millimètres). Il correspond à une surface de 1 m². Tout format autre que A_0 se déduit de celui qui porte un numéro immédiatement inférieur en divisant par deux l'une des dimensions de ce dernier. Ainsi on trouve les formats suivants : $A_1 = 594 \times 840$, $A_2 = 420 \times 594$, $A_3 = 297 \times 420$, $A_4 = 210 \times 297$ (fig. IV-1).

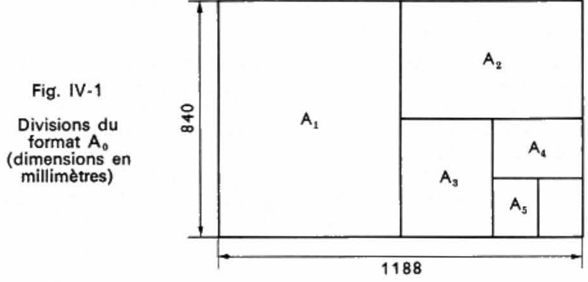


Fig. IV-1 Divisions du format A_0 (dimensions en millimètres)

2° Par pliage tous les formats peuvent se ramener au format *A*4. Plier d'abord le dessin dans le sens de la hauteur (fig. IV-2) en plaçant le cartouche à l'extérieur; plier ensuite « en accordéon » de façon à laisser apparaître le cartouche d'inscriptions à la partie supérieure.

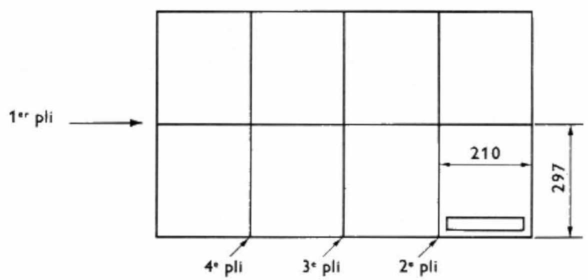


Fig. IV-2 — Exemple de pliage pour un format A_1

3° Le cartouche d'inscriptions (fig. IV-3), placé en bas et à droite du dessin, doit comporter une case d'identification indiquant le nom de la firme, le numéro du

A B C D E F G H I J K L M N
O P Q R S T U V W X Y Z
É À Ï Î Ç Û Œ

a b c d e f g h i j k l m n
o p q r s t u v w x y z
é à ï î ç û œ

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

A B C D E F G H I J K L M N
O P Q R S T U V W X Y Z
É À Ï Î Ç Û Œ

a b c d e f g h i j k l m n
o p q r s t u v w x y z
é à ï î ç û œ

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

Fig. IV-4

dessin, les indices des modifications successives, le titre du dessin (désignation de l'appareil ou de l'organe), l'échelle et la nomenclature des pièces constitutives s'il s'agit d'un ensemble. La nomenclature présente sous forme d'un tableau la liste des pièces de l'appareil ou du sous-ensemble. Elle est située au-dessus du cartouche et établie de bas en haut selon l'ordre de montage des pièces. Elle comprend diverses colonnes et rubriques (fig. IV-3), soit de gauche à droite : repère, nombre de pièces par appareil, désignation, matière, masse et observations. Cette dernière rubrique contient éventuellement des indications sur l'état physique de la matière à fournir aux ateliers, les traitements thermiques et aussi les numéros des normes

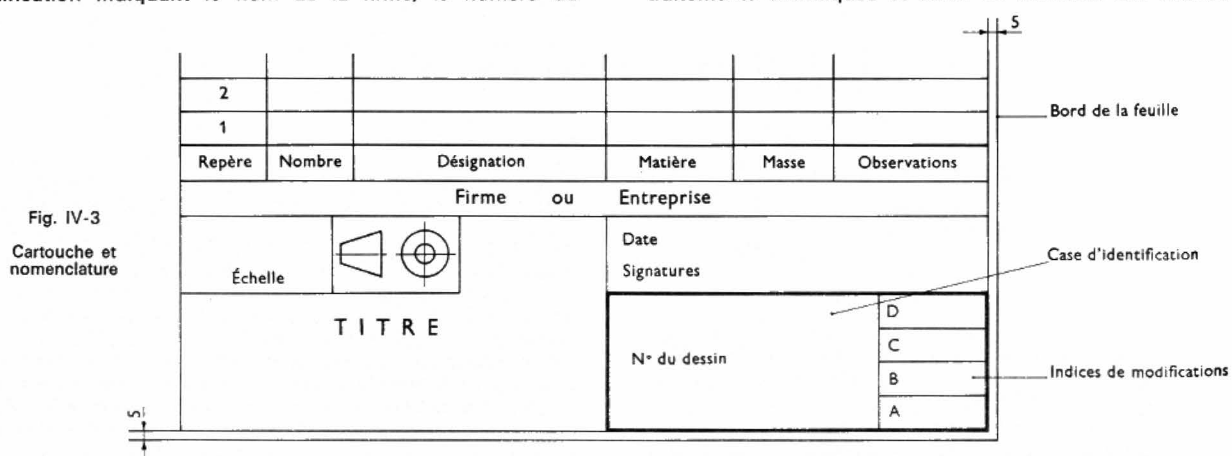


Fig. IV-3 Cartouche et nomenclature

pour les organes normalisés ou les numéros des dessins de détail. La nomenclature permet aux services de préparation du travail de faire les récapitulations nécessaires aux différents ateliers et services chargés de la fabrication.

1.2. Écritures normalisées. — La norme NF E 04-105 d'octobre 1949 impose la forme et les dimensions des caractères à employer pour les écritures et les chiffres techniques. Ces caractères peuvent être droits ou penchés à 75°. La figure IV-4 présente un exemple d'écriture normalisée, appelée « écriture bâton ». La hauteur des lettres dépend de celle du corps d'écriture choisi. Les hauteurs de corps normalisées sont dans la série principale : 1 ; 1,6 ; 2,5 ; 4 ; 6,3 ; 10, etc. Les minuscules sans jambages, comme a, c, e, ont une hauteur égale à un corps, celles avec jambage, comme b, d, f, une hauteur égale à 1,6 corps. Les majuscules ont pour hauteur 1,6 corps ainsi que les chiffres.

1.3. Traits normalisés. — Ils sont l'objet du projet de norme en application PN E. 04-103 d'octobre 1960. Les différents traits utilisés en dessin sont les suivants (fig. IV-5).

Trait continu fort
Trait continu fin
Trait interrompu court moyen
Trait interrompu long et fin
Trait mixte fin
Trait mixte fin terminé par deux traits forts
Trait mixte fort

Fig. IV-5 — Largeurs et nature des traits

1.3.1. Trait continu fort. — Il est employé pour les arêtes et contours des vues, les coupes et les sections sorties. Ce trait, aussi large que possible et choisi en fonction de l'échelle et de la nature du dessin, doit permettre une bonne reproduction et une bonne lisibilité du dessin.

1.3.2. Trait continu fin. — Il est utilisé pour les lignes de cotes, les hachures, les contours des pièces voisines de celles étudiées, les constructions géométriques, les fonds de filets des filetages vus. Son épaisseur varie de 0,1 à 0,25 au maximum ; elle doit rester constante pour un même dessin, comme toutes les autres épaisseurs de trait.

1.3.3. Trait interrompu court moyen. — Il est réservé à la représentation des arêtes et contours cachés et des filetages cachés. Sa largeur est de 0,5 fois celle de la largeur du trait fort du groupe choisi pour le dessin.

1.3.4. Trait interrompu long et fin. — Il est utilisé pour les hachures des parties réalisées en métaux cuivreux.

1.3.5. Trait mixte fin. — Il sert pour les tracés des plans de symétrie, des axes de pièces de révolution, des positions extrêmes de pièces mobiles dans un dessin d'ensemble, des parties ou formes situées en avant d'un plan de coupe, des circonférences primitives des roues dentées.

1.3.6. Trait mixte fin terminé aux deux extrémités par deux traits forts. — Il est employé pour les traces des plans de coupe.

1.3.7. Trait mixte fort. — Il permet le repérage des surfaces devant subir un traitement thermique.

1.4. Échelles. — Le projet de norme en application PN E. 04-101 d'octobre 1960 oblige à indiquer sur les dessins les échelles utilisées par des nombres entiers ou décimaux. On distingue principalement les échelles ci-après :

— Échelle : 1 (grandeur d'exécution). Préférable à toute autre.
— Échelles d'agrandissement : 2 ; (2,5) ; 5 ; 10 ; 20 ; 50 ; 100 ; etc.
— Échelles de réduction : 0,5 ; (0,4) ; 0,2 ; 0,1 ; 0,05 ; (0,04) ; 0,02 ; 0,01.

L'emploi des échelles indiquées entre parenthèses est à éviter. À titre exceptionnel, des échelles différentes peuvent être utilisées.

2. PROJECTIONS

Les principes de représentation des solides utilisés en géométrie descriptive constituent les bases de la représentation employée en dessin industriel. Les projections orthogonales sont faites sur deux ou trois plans principaux selon la complexité des formes de la pièce conformément au projet de norme en application PN E. 04-101.

2.1. Méthode de projection européenne ou méthode *E*. — On choisit les plans de projection de telle sorte qu'ils constituent les six faces d'un cube appelé « cube de projection » (fig. IV-6). Les faces inférieure

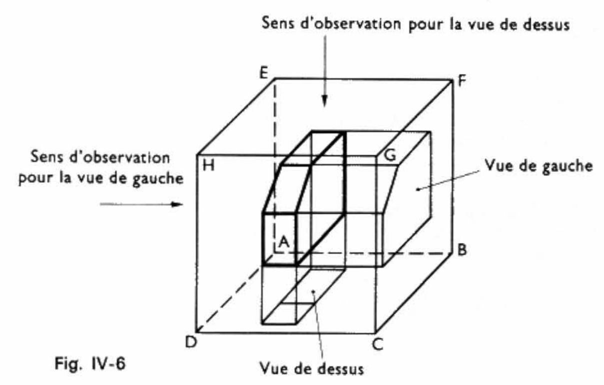


Fig. IV-6
Solide placé à l'intérieur du « cube de projection »

ABCD, et supérieure *EFGH*, sont disposées horizontalement ; les faces arrière *ABFE* et avant *DCGH*, sont de front ; les faces latérales *ADHE* et *BCGF* sont de profil. Le solide est placé à l'intérieur du cube de projection de telle manière que ses faces ou ses plans de symétrie principaux soient disposés parallèlement ou perpendiculairement aux faces du cube. Après projection du solide sur les faces du cube, celles-ci sont rabattues sur le plan de front arrière *ABFE*, tandis que la face avant se rabat conventionnellement à droite du plan de profil de droite. Alors qu'en géométrie descriptive on représente les droites d'intersection des plans de projection, appelées « lignes de terre », en dessin on ne représente pas les arêtes du cube de référence. Bien qu'on ne représente pas les lignes de rappel entre les vues, celles-ci doivent se correspondre horizontalement et verticalement. Pour le solide représenté par la figure précédente on obtient les projections orthogonales (fig. IV-7). Les lignes vues (arêtes et contours apparents) sont représentées en trait fort, les lignes cachées en trait interrompu moyen. Le nom donné à chaque vue correspond à la position d'un observateur regardant la pièce et qui la voit se projeter sur le plan correspondant. Les rayons visuels sont supposés parallèles entre eux et la pièce placée entre l'observateur et le plan de projection. La vue de face correspond à la projection de la pièce sur le plan de front arrière (V. fig. IV-7),

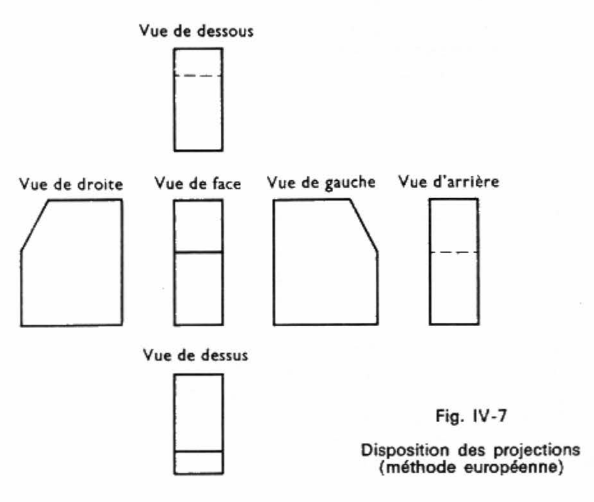


Fig. IV-7
Disposition des projections (méthode européenne)

l'observateur étant placé face à la pièce, et en avant de celle-ci. La vue de dessus correspond à un observateur placé au-dessus de la pièce, la projection se fait sur le plan horizontal inférieur (V. fig. IV-6 et IV-7). Pour la vue de gauche, l'observateur est placé à gauche de la pièce et la projection est réalisée sur le plan de profil de droite. Le symbole de cette méthode (fig. IV-8) doit être indiqué dans le cartouche du dessin à côté de l'échelle. En effet,



Fig. IV-8 — Méthode E

Fig. IV-9 — Méthode A

afin d'éviter des confusions dans l'interprétation des formes de la pièce dessinée, il importe de distinguer cette méthode *E* de la méthode *A* (américaine) dans laquelle le plan d'observation est situé entre l'observateur et la pièce (fig. IV-9).

2.2. Vues particulières. — Si diverses raisons (facilités de mise en page ou simplification de représentation) imposent une autre disposition des vues, le sens d'observation est alors indiqué par une flèche repérée par une lettre majuscule (fig. IV-10).

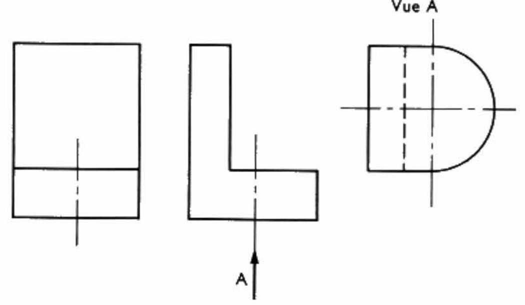


Fig. IV-10 — Vue déplacée par translation

La vue d'une pièce peut être incomplète, en particulier lorsque la section de la partie interrompue est constante. Les parties extrêmes sont rapprochées et limitées par un trait continu fin tracé à main levée (fig. IV-11). Les pièces

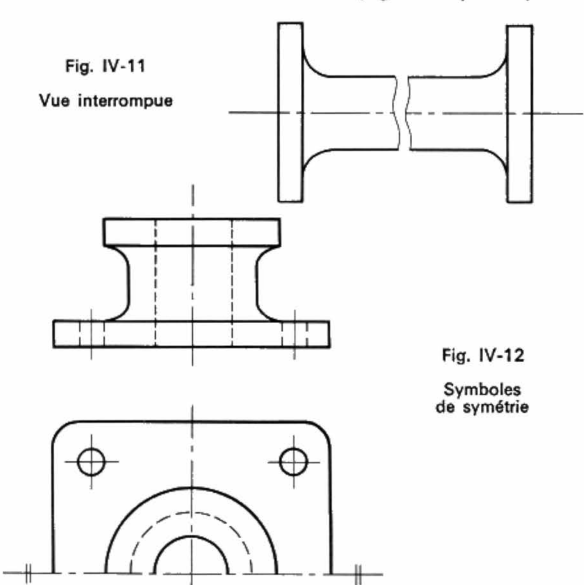


Fig. IV-11

Vue interrompue

Fig. IV-12

Symboles de symétrie

ayant un plan de symétrie peuvent être représentées par des demi-vues. Une demi-vue doit être limitée par la trace du plan de symétrie. La symétrie est indiquée par un symbole spécial formé de deux petits traits parallèles placés à chacune des deux extrémités de la trace du plan de symétrie (fig. IV-12). Quand une face d'une pièce ne

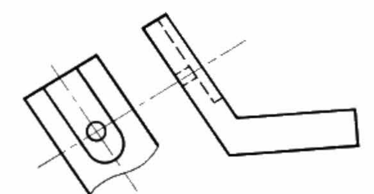


Fig. IV-13

Projection sur un plan auxiliaire oblique

se projette pas en vraie grandeur sur l'une des faces du cube de projection, parce que sa direction est oblique, on projette cette face sur un plan de projection oblique choisi parallèlement à la face considérée (fig. IV-13). Cette vue de la face en vraie grandeur peut être une vue partielle de la pièce, limitée par un trait continu fin tracé à main levée, comme dans le cas des pièces longues.

2.3. Pièces de révolution. — Les pièces cylindriques, coniques ou sphériques peuvent être représentées par une seule vue: vue de face longitudinale ou coupe longitudinale. Si la pièce est creuse elle donne la section génératrice et elle suffit à définir les formes de la pièce et à permettre la cotation complète. Si la pièce comporte des méplats

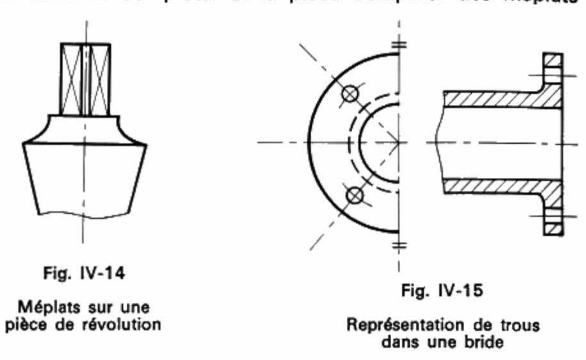


Fig. IV-14

Méplats sur une pièce de révolution

Fig. IV-15

Représentation de trous dans une bride

ou un carré, ils sont représentés sur la vue longitudinale par des traits fins placés en diagonale et la cote est indiquée sur plats (fig. IV-14). Les pièces percées de trous régulièrement répartis sur une circonférence sont figurées en coupe longitudinale, l'axe de ces trous ramené dans le plan méridien de la pièce (fig. IV-15).

2.4. Choix des vues. — Pour définir complètement la pièce, avec un minimum de vues, on choisit celles qui la montrent le mieux. Les vues particulières y réussissent et simplifient la représentation.

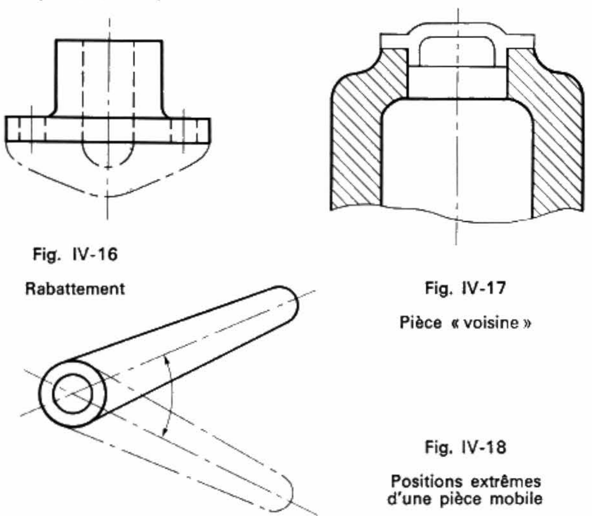


Fig. IV-16

Rabattement

Fig. IV-17

Pièce « voisine »

Fig. IV-18

Positions extrêmes d'une pièce mobile

Par exemple, pour les rabattements (fig. IV-16), la section rabattue et la section sortie (V. ci-après). Dans les dessins d'ensemble les pièces voisines de celles étudiées sont représentées par un trait continu fin (fig. IV-17), et les positions extrêmes d'une pièce mobile par un trait mixte fin (fig. IV-18).

Matière	Hachure	Description
Antifriction et de façon générale toutes matières coulées sur une pièce		Hachures simples dans le sens de la plus grande dimension de la section
Faibles épaisseurs à hachurer		Trait de la largeur de la partie à hachurer
Par dérogation on peut, dans certains cas, utiliser les hachures conventionnelles ci-après :		
Bois en coupe transversale		Hachures irrégulières à main levée
Bois en coupe longitudinale		Hachures irrégulières à main levée
Matières plastiques ou isolantes et garnitures		Hachures simples et de même espacement, les unes dans le sens de la plus grande dimension de la section, les autres à 45° par rapport aux premières
Toutes coupes et sections		Hachures en traits fins espacés régulièrement et inclinés suivant un angle bien accusé, de préférence à 45°
Cuivre et alliages où domine le cuivre		Hachures à traits alternativement continus et interrompus longs
Métaux et alliages légers		Hachures continues d'espacements inégaux alternés

3. COUPES ET SECTIONS

Les coupes et les sections permettent la représentation des formes intérieures des pièces creuses en évitant le tracé de nombreux pointillés. Elles rendent les vues plus claires et plus lisibles.

3.1. Mode d'exécution. — Le plan de coupe doit être parallèle au plan de projection qui correspond à la vue considérée et il doit passer par l'axe des formes intérieures de la pièce à représenter. La partie de la pièce située en avant du plan de coupe par rapport à l'observateur est supposée enlevée. La partie restante est projetée sur le plan de projection et des hachures sont tracées sur la surface de la matière fictivement coupée. Le plan de coupe est repéré par un trait mixte fin, renforcé aux deux extrémités par deux traits forts. Des lettres majuscules sont inscrites aux deux extrémités sur deux flèches indiquant le sens d'observation. La coupe est également désignée par les mêmes lettres, conformément à la disposition normalisée (fig. IV-19).

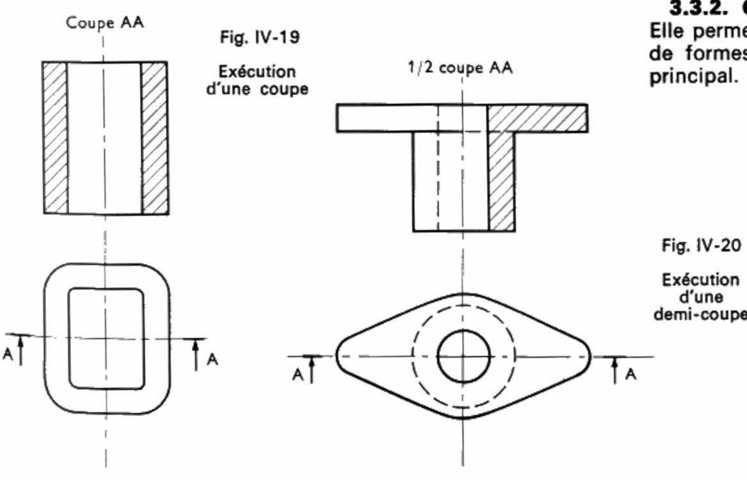


Fig. IV-19 Exécution d'une coupe

Fig. IV-20 Exécution d'une demi-coupe

3.2. Hachures. — Les hachures doivent être exécutées conformément au projet de norme en application PNE 04-104 d'octobre 1960 (V. tableau). La nature exacte du matériau employé doit être indiquée dans la nomenclature.

3.3. Différentes sortes de coupes et de sections normalisées

3.3.1. Demi-coupe (fig. IV-20). — Employée pour une pièce symétrique, elle permet deux représentations : l'une en vue extérieure, l'autre en coupe.

3.3.2. Coupe brisée à plans sécants (fig. IV-21). — Elle permet la représentation en vraie grandeur d'éléments de formes disposés obliquement par rapport à un plan principal.

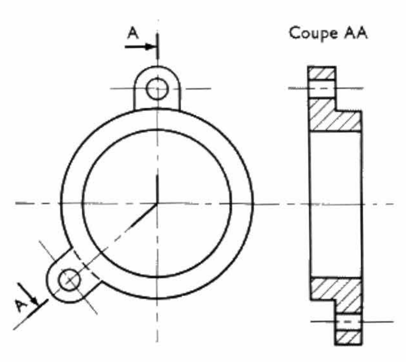


Fig. IV-21 — Coupe brisée à plans sécants

3.3.3. Coupe brisée à plans parallèles (fig. IV-22). — Elle permet la représentation sur une seule vue d'éléments de formes disposés dans des plans parallèles différents.

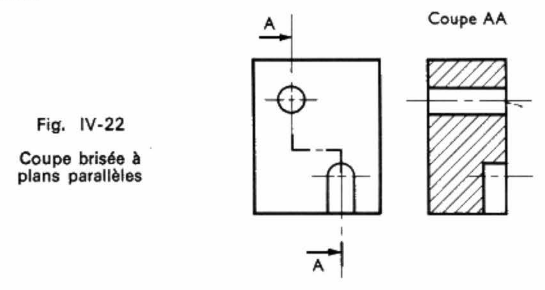


Fig. IV-22

Coupe brisée à plans parallèles

3.3.4. Coupe locale (fig. IV-23). — Elle permet la représentation, sans pointillés, des formes intérieures pour certains détails (trous taraudés, rainures de clavette, etc.).

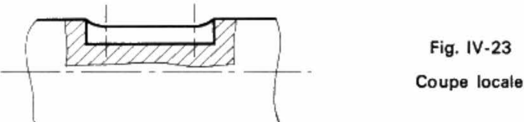


Fig. IV-23

Coupe locale

3.3.5. Section sortie (fig. IV-24). — Elle est utilisée pour indiquer la forme de la section des pièces à section constante ou variable (profilés, bras de poulie, leviers).

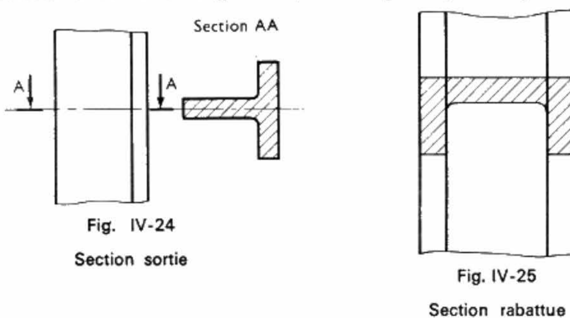


Fig. IV-24

Section sortie

Fig. IV-25

Section rabattue

3.3.6. Section rabattue (fig. IV-25). — Elle est employée dans des cas assez voisins des précédents.

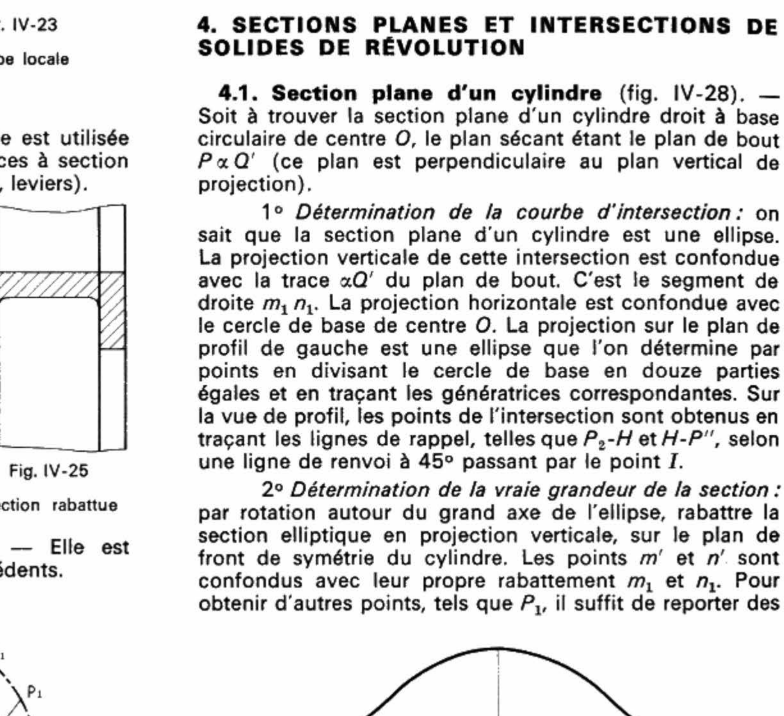
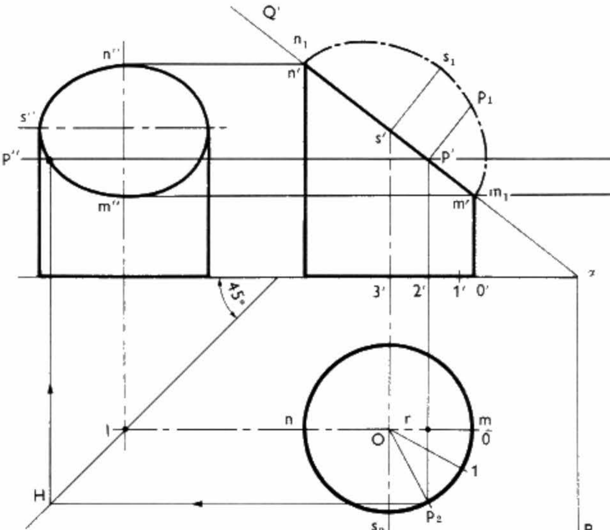


Fig. IV-26

Coupe avec formes de révolution

Fig. IV-27



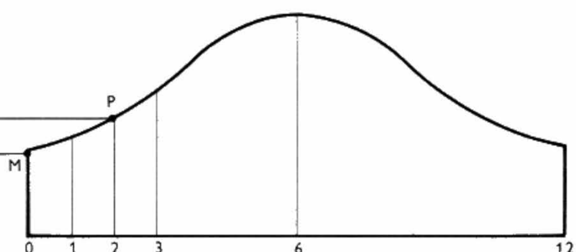


Fig. IV-28 — Développement du cylindre

3.4. Remarques. — 1° Les arbres, les axes et les pièces de révolution ne se coupent pas dans le sens de la longueur (fig. IV-26). 2° Les nervures des pièces ne se coupent pas dans le sens de leur plus grande dimension; elles apparaissent en vue extérieure, dans une coupe longitudinale (fig. IV-27).

4. SECTIONS PLANES ET INTERSECTIONS DE SOLIDES DE RÉVOLUTION

4.1. Section plane d'un cylindre (fig. IV-28). — Soit à trouver la section plane d'un cylindre droit à base circulaire de centre O, le plan sécant étant le plan de bout $P \alpha Q'$ (ce plan est perpendiculaire au plan vertical de projection).

1° *Détermination de la courbe d'intersection :* on sait que la section plane d'un cylindre est une ellipse. La projection verticale de cette intersection est confondue avec la trace $\alpha Q'$ du plan de bout. C'est le segment de droite $m_1 n_1$. La projection horizontale est confondue avec le cercle de base de centre O. La projection sur le plan de profil de gauche est une ellipse que l'on détermine par points en divisant le cercle de base en douze parties égales et en traçant les génératrices correspondantes. Sur la vue de profil, les points de l'intersection sont obtenus en traçant les lignes de rappel, telles que P_2-H et H-P'', selon une ligne de renvoi à 45° passant par le point I.

2° *Détermination de la vraie grandeur de la section :* par rotation autour du grand axe de l'ellipse, rabattre la section elliptique en projection verticale, sur le plan de front de symétrie du cylindre. Les points m' et n' sont confondus avec leur propre rabattement m_1 et n_1. Pour obtenir d'autres points, tels que P_1, il suffit de reporter des segments égaux, tels que $P'P'_1 = P_2r$. Le petit demi-axe de l'ellipse est $s's_1 = Os_3$.

3° *Développement du cylindre :* utiliser les douze divisions tracées précédemment sur les génératrices correspondantes du cylindre; porter les vraies grandeurs des génératrices mesurées sur la projection verticale telles que $2\,P = 2'\,P'$.

4.2. Section plane d'un cône (fig. IV-29). — Soit un cône à base circulaire de centre O, coupé par le plan de front se projetant horizontalement suivant P. L'intersection est un arc d'hyperbole que l'on trace par points en utilisant la méthode des plans sécants auxiliaires. Il suffit de couper les deux surfaces données (cône et plan P) par des plans auxiliaires horizontaux tels que Q'_1. Le plan

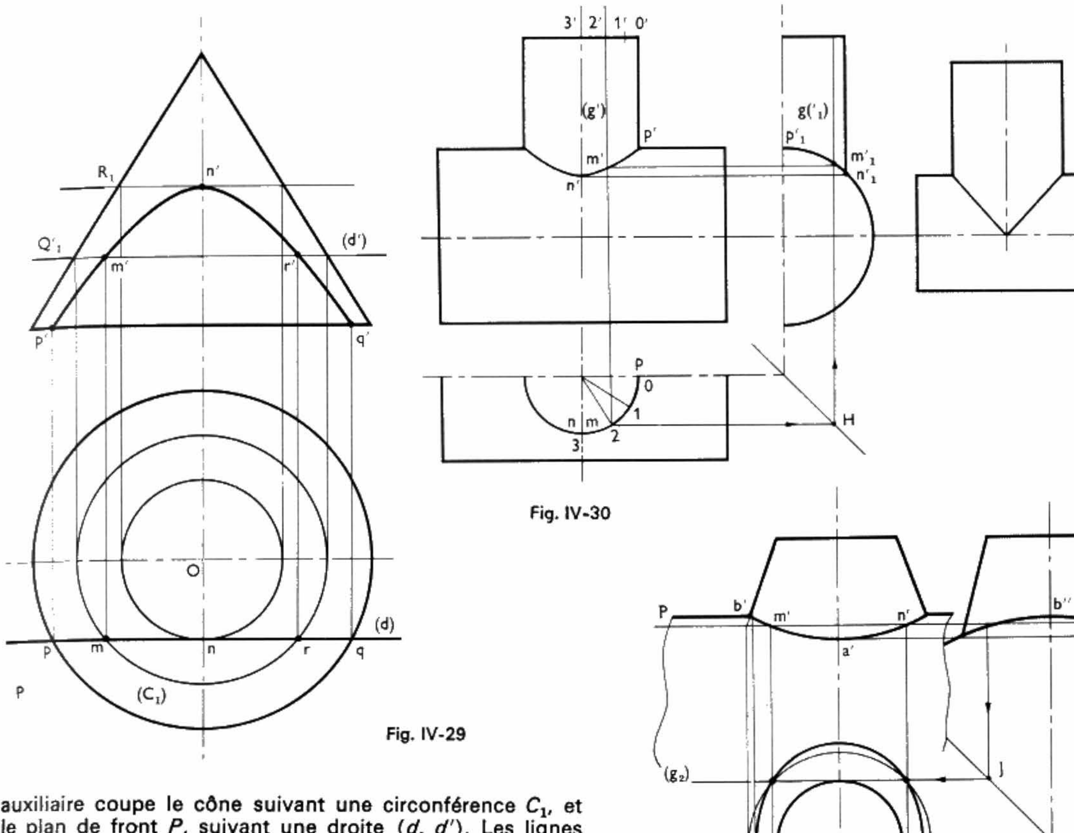


Fig. IV-29

Fig. IV-30

Fig. IV-31

Fig. IV-32

auxiliaire coupe le cône suivant une circonférence C_1, et le plan de front P, suivant une droite (d, d'). Les lignes C_1 et (d) se coupent en m et r, que l'on rappelle en m' et r'. Pour avoir la courbe d'intersection complète, il suffit de prendre un nombre suffisant de plans auxiliaires compris entre la base du cône et le plan horizontal limite supérieur R'_1.

4.3. Intersection de deux cylindres

1° *Les axes des deux cylindres sont perpendiculaires et leurs diamètres sont différents* (fig. IV-30). — Employer la méthode des génératrices, plus simple que celle des plans auxiliaires. Diviser le cercle de base de l'un des cylindres (ici le cylindre d'axe vertical) en douze parties égales. Tracer les génératrices correspondantes (ici la génératrice g' qui passe par la division 2). En utilisant une ligne de renvoi à 45°, sur la vue de profil on trace la projection (g'_1) de cette génératrice qui coupe la projection du cylindre horizontal au point m'_1. Rappeler m'_1 en m' sur la projection (g'). Les points le plus haut p', p'_1, et le plus bas n', n'_1 se déterminent directement au moyen de simples lignes de rappel horizontales.

2° *Les axes des deux cylindres sont perpendiculaires et de même diamètre* (fig. IV-31). — On vérifiera que l'intersection forme un angle de 90° avec ses deux segments de droites.

4.4. Intersection d'un cône et d'un cylindre

(fig. IV-32). — Le cône et le cylindre ont leurs axes perpendiculaires. Couper les deux surfaces par un plan auxiliaire horizontal tel que P. Ce plan coupe le cône suivant une circonférence (C_1) et le cylindre d'axe horizontal suivant deux génératrices (g_1) et (g_2), tracées en projection horizontale, à l'aide de la ligne de renvoi à 45°. Les lignes (C_1), (g_1) et (g_2) se rencontrent en quatre points qui appartiennent à l'intersection cherchée.

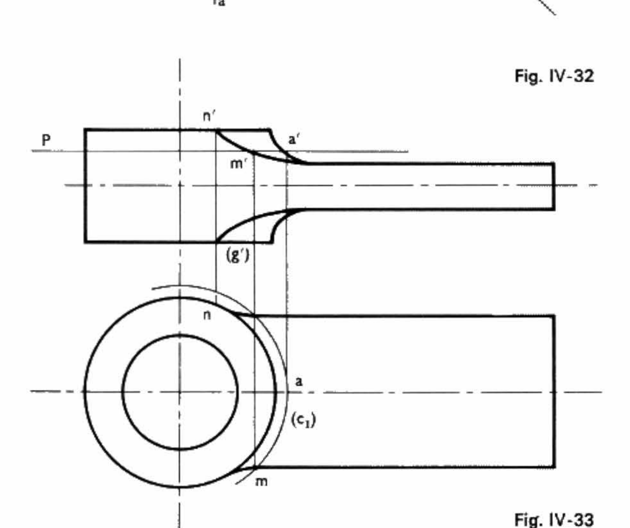


Fig. IV-33

4.5. Intersection d'un tore et d'un cylindre

(fig. IV-33). — Appliquer la méthode des plans auxiliaires et couper les deux surfaces par des plans horizontaux tels que P. On obtient, avec la surface torique, le cercle d'intersection (C_1) et, avec les cylindres qui constituent les congés de raccordement, des génératrices, telles que (g'), en projection frontale. Ces lignes se rencontrent en m' sur la projection frontale, point qui appartient à l'intersection cherchée. Le point le plus haut de la courbe n,n' s'obtient directement.

5. COTATION DES DESSINS

Les cotes indiquent les dimensions des pièces dessinées en vue de leur réalisation. On inscrit les dimensions réelles de la pièce quelle que soit l'échelle du dessin. Les unités employées sont le millimètre pour les longueurs, le degré pour les angles. La cotation complète et rigoureuse définit les formes et les dimensions; aussi rend-elle impossibles ambiguïtés ou contestations lors des opérations de contrôle et de réception des pièces.

5.1. Disposition matérielle des cotes

1° L'inscription d'une cote (fig. IV-34) comprend le tracé des lignes d'attache et de la ligne de cote proprement dite (en traits continus fins), celui des flèches (fig. IV-35

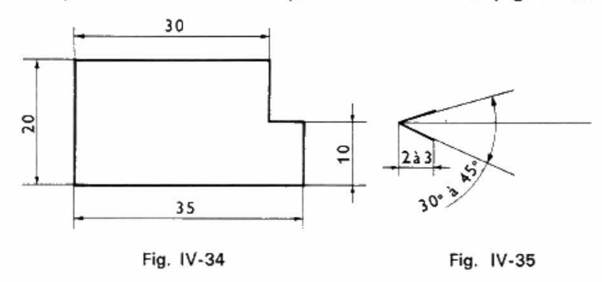


Fig. IV-34 Fig. IV-35

et IV-36) et l'inscription des chiffres de cotes. Les chiffres sont placés au-dessus de la ligne de cote si elle est horizontale. Leur hauteur est de 3 mm ; ils ne sont pas coupés ni séparés par un trait d'axe ou un trait du dessin. Un trait du dessin ou une ligne d'axe peuvent être utilisés comme lignes d'attache mais non comme lignes de cote.

2° Cas particuliers :

a) Cotation en coordonnées (fig. IV-37).

b) Cotation d'éléments équidistants : on indique la cote de l'intervalle entre deux trous, par exemple, et le nombre d'intervalles (fig. IV-38).

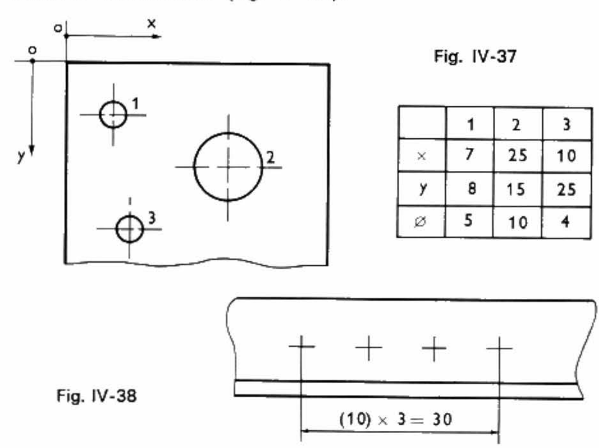


Fig. IV-37

	1	2	3
x	7	25	10
y	8	15	25
⌀	5	10	4

Fig. IV-38

3° L'orientation des chiffres de cotes suit l'inclinaison des lignes de cotes. Leur lecture doit se faire *depuis le bas ou depuis la droite du dessin* (fig. IV-39). Le tracé de lignes de cotes comprises dans l'angle hachuré est évité. Les cotes d'angles sont inscrites conformément aux indications de la figure IV-40.

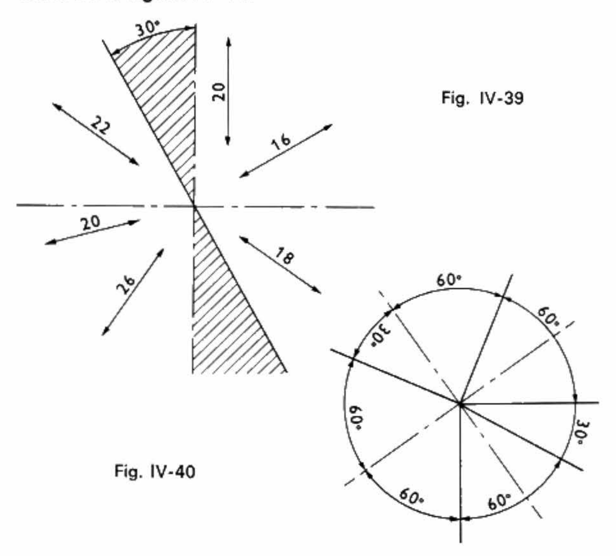


Fig. IV-39

Fig. IV-40

5.2. Symboles utilisés dans la cotation.

— Une cote de diamètre est précédée du symbole ⌀, une cote de rayon du symbole *R*, une cote de surplats d'un carré du symbole □, sauf si le dessin fait apparaître sans ambiguïté qu'il s'agit d'une cote de diamètre, de rayon ou de surplats

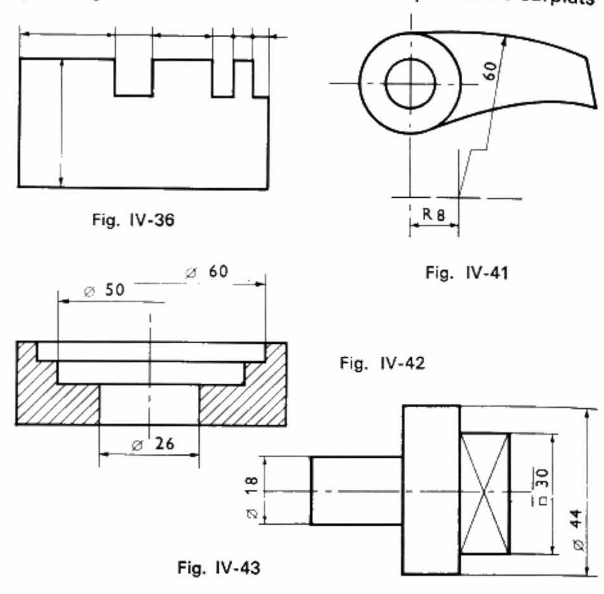


Fig. IV-36

Fig. IV-41

Fig. IV-42

Fig. IV-43

d'un carré. Dans le cas d'une sphère, il faut inscrire l'indication « sphère » en toutes lettres (fig. IV-41, IV-42, IV-43).

5.3. Recommandations relatives à la cotation.

— Éviter que les lignes de cotes ne se coupent entre elles ou ne coupent une ligne d'attache. Éviter également de mettre une flèche au sommet de l'angle de deux traits de contour ; si, par exception, une dimension n'est pas représentée à l'échelle du dessin, souligner la cote correspondante et au besoin mettre une annotation qui évite tout risque de confusion.

5.4. Principes de cotation fonctionnelle

1° Un organe mécanique est constitué par différents éléments aux rôles particuliers, limités par différentes surfaces : les surfaces qui participent à une fonction (guidage, centrage, liaison rigide ou élastique) et les surfaces qui lient entre elles ou enveloppent les surfaces fonctionnelles. Ces surfaces sont déterminées en fonction du procédé de fabrication de l'ébauche (moulage, matricage, soudage).

2° Les principes de cotation fonctionnelle applicables aux dessins de définition de produits finis sont normalisés (PN E. 04-009). Les principaux d'entre eux sont les suivants :

a) Coter toutes les dimensions nécessaires pour définir complètement le produit, en ne faisant usage que des seules dimensions fonctionnelles. Ces dimensions sont celles qui déterminent les éléments fonctionnels dont dépendent les conditions de résistance, de rigidité, de montage, de fonctionnement. Elles ne peuvent se déduire par addition ou soustraction.

b) Ne pas coter plus de dimensions qu'il n'est nécessaire pour définir le produit. Cette règle conduit à ne jamais coter, en plus d'autres dimensions déjà cotées, une dimension qui serait la somme ou la différence des premières.

c) N'inscrire chaque cote qu'une seule fois et sur celle des vues qui représente le plus clairement l'élément coté.

3° Exemple choisi : axe d'articulation de la bielle (1) sur le bâti (2) (fig. IV-44 et IV-45).

a) Les cotes *a* et d_1 conditionnent la possibilité d'articulation de la bielle (1) autour de l'axe (3) sans blocage latéral.

b) Les cotes *b* et d_2 conditionnent la possibilité de montage de l'axe dans le bâti (2) et le serrage de l'axe sur le bâti, entre l'épaulement et la rondelle (4).

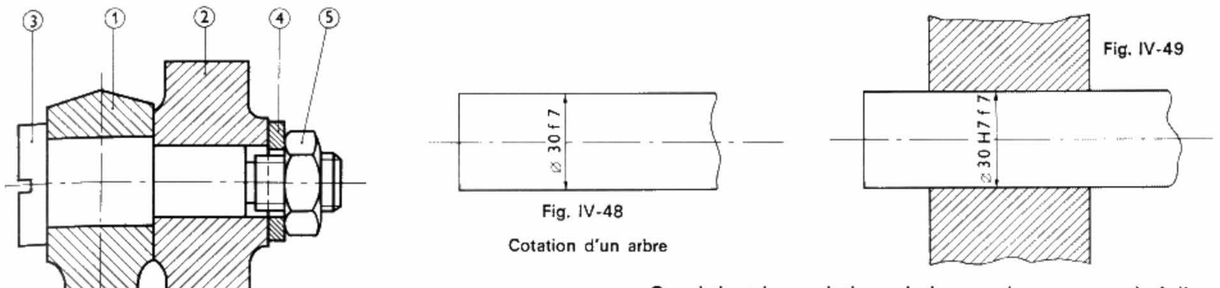


Fig. IV-44

Fig. IV-48
Cotation d'un arbre

Fig. IV-49

c) Les cotes *c* et d_3 conditionnent la possibilité de montage de l'écrou (5) et de la rondelle (4) ainsi que le serrage sur le bâti (2).

d) La cote *e* conditionne la résistance mécanique de la tête de l'axe, aux efforts latéraux.

Inscrire directement les cotes fonctionnelles d_1, d_2, d_3, *e*, *a*, *b*, *c*, sur le dessin de définition de produit fini de l'axe, ainsi qu'il est représenté par la figure IV-45. (On trouvera au chapitre 5 une étude plus approfondie de la cotation fonctionnelle).

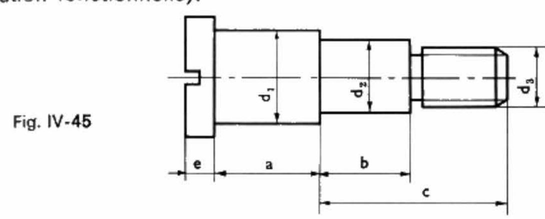


Fig. IV-45

5.5. Indication des tolérances. — Si une dimension est comprise entre deux limites, la cote porte l'indication de la dimension nominale suivie de celle, dans la même unité, des deux écarts écrits l'un en dessous de l'autre. Ainsi une dimension comprise entre 49,95 et 50,05 sera cotée $50^{+0,05}_{-0,05}$. On inscrit toujours au-dessus l'écart correspondant à la limite supérieure, et l'on donne aux deux écarts le même nombre de décimales. On les affecte du même signe si l'un d'eux est zéro. *Exemples de cotation :*

$$30^{-0,10}_{-0,15} \qquad 30^{-0,1}_{-0,2} \qquad 30^{+0,05}_{+0,00}$$

Pour l'indication des tolérances on adopte, en général, le système ISO (Organisation Internationale de Normalisation) afin de réduire le nombre d'ajustements possibles, donc le nombre de calibres de vérification. Le plus souvent on se borne dans ce cas à adopter le système de l'alésage normal dans lequel on emploie toujours un alésage *H*.

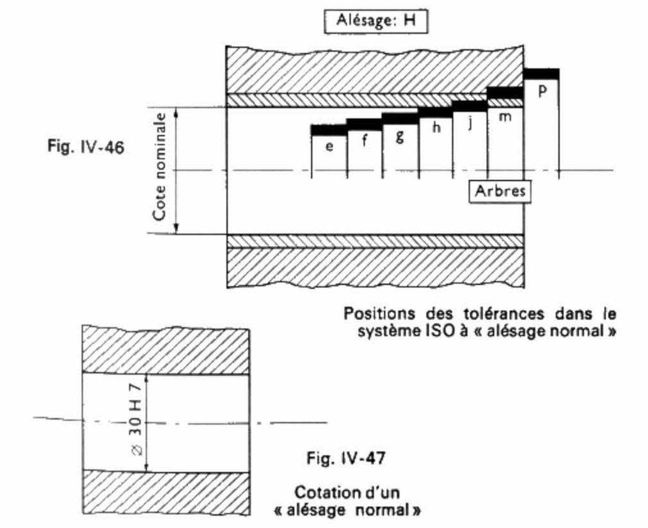


Fig. IV-46

Positions des tolérances dans le système ISO à « alésage normal »

Fig. IV-47

Cotation d'un « alésage normal »

On obtient les variations de jeu ou de serrage qui réalisent des montages différents par le changement de position de la tolérance sur l'arbre. La position des tolérances est alors conforme à la figure IV-46. Dans la cotation de la pièce, on fait suivre l'indication de la cote nominale, du symbole ISO qui correspond à la tolérance choisie (fig. IV-47, IV-48, IV-49).

6. INDICATIONS DE FAÇONNAGE ET TOLÉRANCES DE FORME

6.1. Indications de façonnage. — Elles doivent être indiquées quand le degré d'usinage n'est pas évident. On porte les indications de façonnage au moyen de symboles normalisés uniquement sur les dessins de « produits finis » (NF E. 04-011) et non sur les dessins d'ensembles montés.

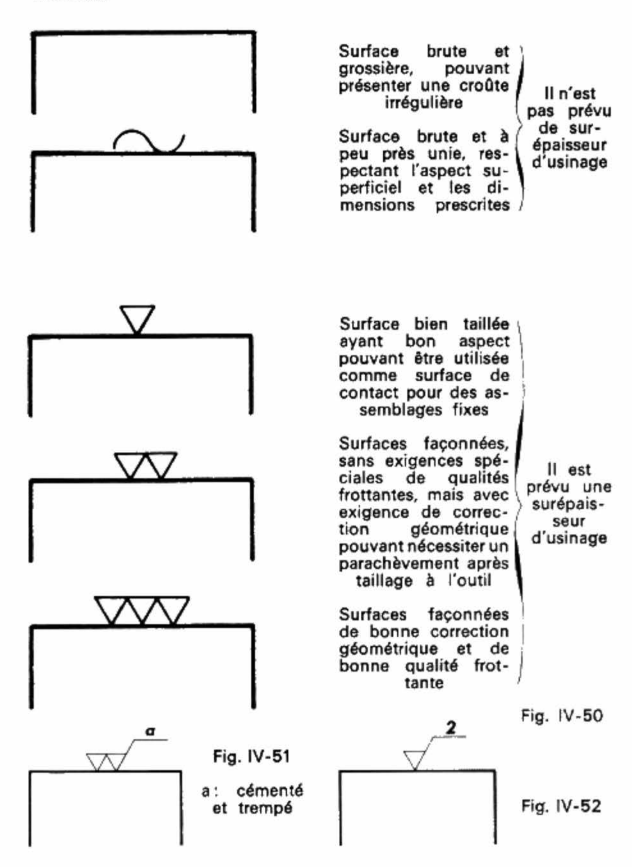


Fig. IV-50

Fig. IV-51

Fig. IV-52

Les signes conventionnels (fig. IV-50) doivent être toujours placés à l'extérieur de la matière à façonner, soit du côté de l'outil. Si des indications de façonnage plus précises ou particulières sont nécessaires, on les indique au moyen d'un renvoi et d'une légende (fig. IV-51). Les cotes des surépaisseurs d'usinage qu'il est absolument nécessaire de prévoir sont indiquées en millimètres par un chiffre placé à droite du signe de façonnage (fig. IV-52). On porte les indications de façonnage sur les lignes représentatives des surfaces ou sur leurs prolongements et, autant que possible, au voisinage des lignes de

Fig. IV-53

cotes correspondantes (fig. IV-53). Les indications de façonnage ne sont portées que sur une seule des deux génératrices des pièces de révolution (fig. IV-53) et sur une seule vue si la pièce en comporte plusieurs. Lorsqu'une pièce doit avoir le même degré de façonnage sur toutes ses faces sans exception, on porte le signe de façonnage à côté du numéro de la pièce dans la nomenclature, ou à côté du titre de la pièce ; on ajoute, s'il y a lieu, en toutes lettres « façonné partout » (fig. IV-54).

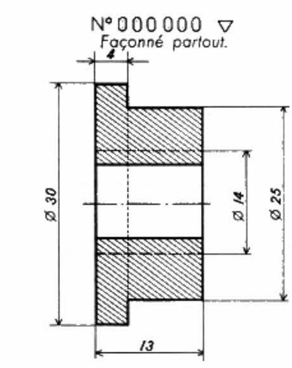


Fig. IV-54

Lorsqu'une pièce doit avoir le même degré de façonnage sur toutes ses faces, à l'exception d'une ou de deux d'entre elles façonnées à un degré supérieur, on porte le

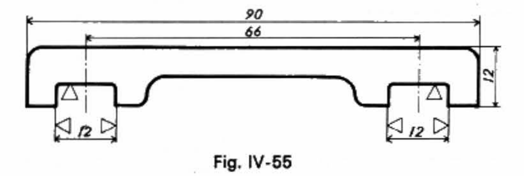


Fig. IV-55

signe de façonnage de l'ensemble à côté du numéro ou du titre de la pièce, sans ajouter « façonné partout », et l'on porte le signe de façonnage spécial sur les parties à travailler spécialement (fig. IV-55).

6.2. États de surface. — La surface d'une pièce fabriquée ne peut pas être absolument identique à celle que définit le dessin. Elle s'en différencie notamment par des irrégularités de forme, dites *macrogéométriques*, et des irrégularités dues à la rugosité, dites *microgéométriques*. Le projet de norme PN E. 05-012 donne le moyen de définir l'état macrogéométrique d'une surface et de procéder à la vérification correspondante. Ce projet de norme doit être appliqué chaque fois que les signes de façonnage ne suffisent pas à préciser l'état de finition d'une surface qui doit être particulièrement soigné. Le projet de norme PN E. 05-001 définit un certain nombre de termes généraux concernant les états de surface, ainsi que les critères de rugosité.

6.3. Tolérances de forme et de position. — Il est souvent indispensable d'imposer des tolérances de forme et de position afin que la pièce réponde exactement à sa fonction. Le projet de norme PN E. 04-121 donne un certain nombre de définitions à ce sujet et les symboles qui y correspondent.

On définit notamment :

1° Des *surfaces enveloppes :*

a) *Le plan enveloppe* d'une surface spécifiée plane : c'est le plan parallèle à la direction générale de la surface et qui touche celle-ci sans la couper, du côté extérieur à la pièce (fig. IV-56).

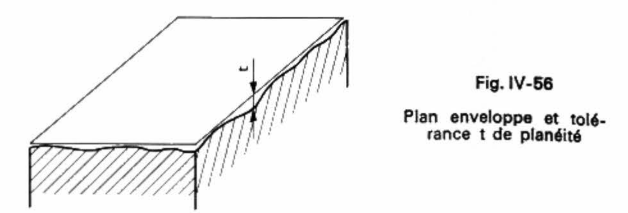


Fig. IV-56

Plan enveloppe et tolérance t de planéité

b) *Le cylindre enveloppe* d'une surface spécifiée cylindrique est le cylindre qui touche cette surface sans la couper, du côté extérieur, et dont le diamètre est minimal ou maximal, suivant qu'il s'agit d'un cylindre extérieur ou d'un cylindre intérieur (fig. IV-57 et IV-58).

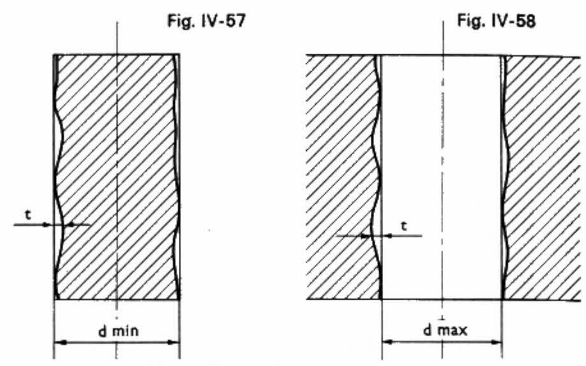


Fig. IV-57 Fig. IV-58

Cylindres enveloppes et tolérances t de cylindricité

2° Des *tolérances de formes :*

a) *La tolérance de planéité* est le plus grand écart admissible entre tout point de la surface considérée et son plan enveloppe (V. fig. IV-56).

b) *La tolérance de cylindricité* est le plus grand écart radial admissible entre tout point de la surface considérée et son cylindre enveloppe (V. fig. IV-57 et IV-58).

3° Des *tolérances de position* (fig. IV-59 à IV-66) :

a) *La tolérance de parallélisme* d'une surface ou d'une ligne par rapport à une surface est le plus grand écart admissible entre tout point de la portion de surface ou de ligne considérée et le plan parallèle à la surface de référence qui touche cette surface ou cette ligne sans la couper (fig. IV-59).

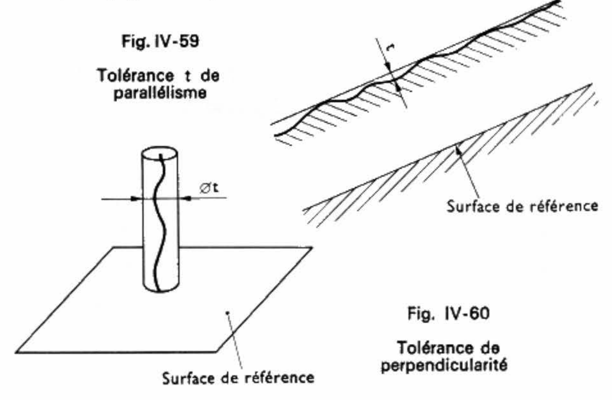


Fig. IV-59

Tolérance t de parallélisme

Fig. IV-60

Tolérance de perpendicularité

b) *La tolérance de perpendicularité* d'une ligne par rapport à une surface est le diamètre d'un cylindre dont l'axe est perpendiculaire à la surface de référence et dans lequel doit être contenu la ligne considérée (fig. IV-60).

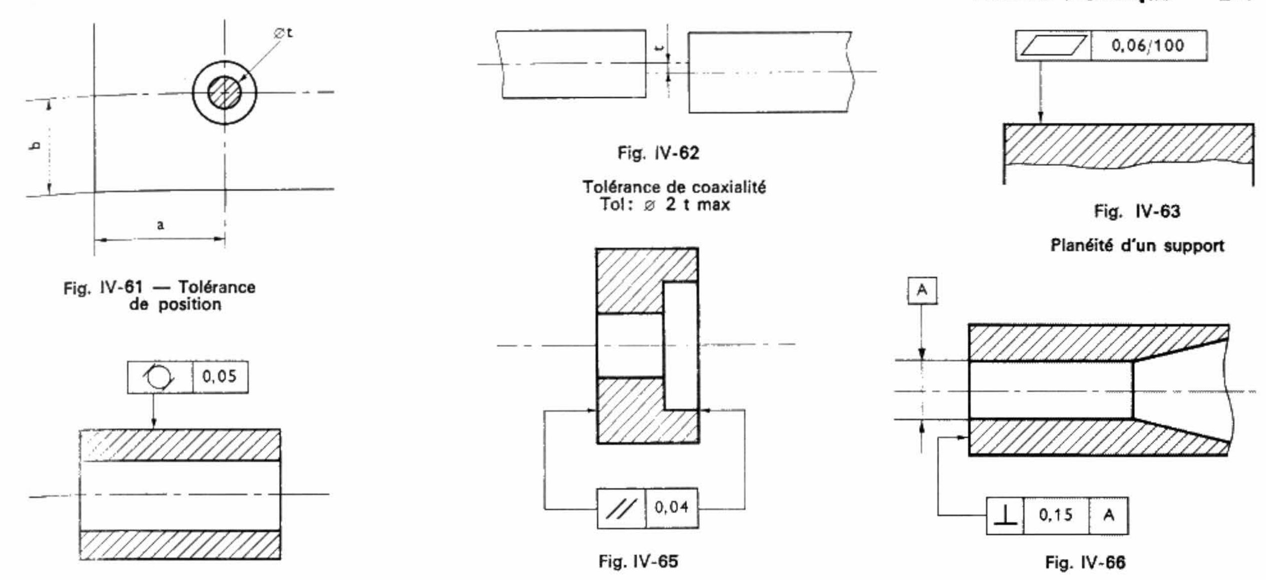


Fig. IV-61 — Tolérance de position

Fig. IV-62

Tolérance de coaxialité
Tol : ∅ 2 t max

Fig. IV-63

Planéité d'un support

Fig. IV-64 — Tolérance de cylindricité

Fig. IV-65

Tolérance de parallélisme de deux faces

Fig. IV-66

Tolérance de perpendicularité d'une face et d'un axe

c) *La tolérance de position* est le double de la plus grande distance admissible entre la position réelle de l'élément considéré et sa position théorique définie par les cotes encadrées. Dans le cas d'un axe de révolution, c'est le diamètre du cylindre à l'intérieur duquel l'axe de l'élément doit se trouver (fig. IV-61).

d) *La tolérance de coaxialité* est le double de la plus grande distance admissible entre deux axes parallèles (fig. IV-62).

7. REPRÉSENTATIONS SIMPLIFIÉES

Certains éléments de machine souvent représentés sont l'objet de conventions particulières qui permettent de simplifier leur tracé, notamment les filetages, les ressorts et les soudures.

7.1. Représentations simplifiées des filetages

7.1.1. Filetages vus (fig. IV-67 et IV-68). — Le cylindre qui passe par le sommet des filets est dessiné en trait continu fort et le diamètre à fond de filet en trait continu fin. On indique la limite du filetage par un trait continu fort perpendiculaire à l'axe. Les filets incomplètement formés sont représentés par le cône à fond de filet. Le chanfrein en bout de la tige est incliné à 45° et a pour hauteur $\frac{d}{10}$ (d représentant le diamètre du cylindre passant par le sommet des filets). Pour les filetages vus en coupe, on limite les hachures au trait continu fort qui représente l'avant-trou de perçage. Pour les tiges filetées et les trous taraudés vus en bout, on représente le cylindre à fond de filet en trait continu fin sur les trois quarts de la circonférence.

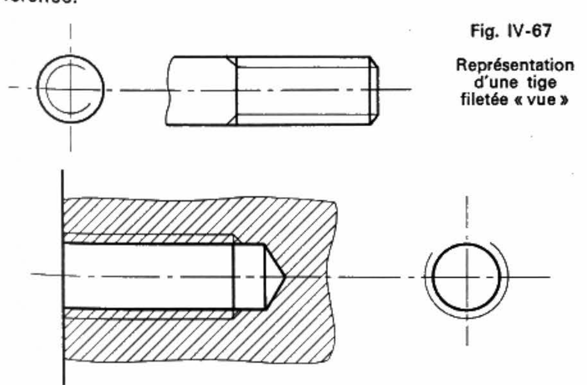


Fig. IV-67

Représentation d'une tige filetée « vue »

Fig. IV-68 — Représentation d'un trou taraudé « vu »

7.1.2. Filetages cachés (fig. IV-69). — Un trou taraudé caché est représenté en trait interrompu court et moyen (avant-trou et taraudage).

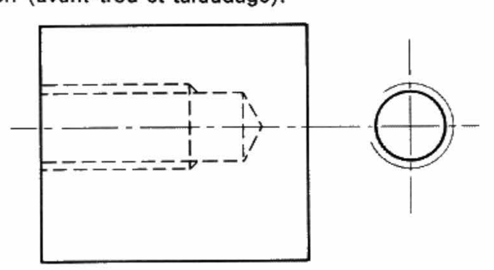


Fig. IV-69 — Représentation d'un trou taraudé caché

7.1.3. Assemblage vis-écrou (fig. IV-70). — Dans la vue en coupe, le contour de la tige filetée est représenté en priorité.

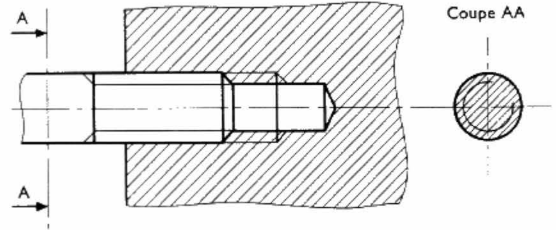
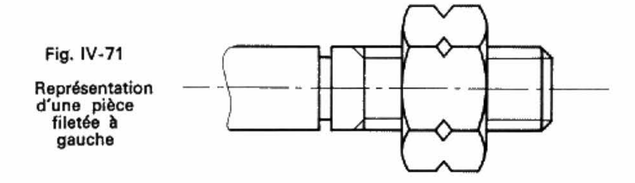


Fig. IV-70 — Représentation d'un assemblage vis-écrou

7.1.4. Pièces filetées à gauche (fig. IV-71). — Elles sont repérées sur le dessin afin d'éviter tout risque de confusion.

Fig. IV-71

Représentation d'une pièce filetée à gauche



7.2. Représentation simplifiée des ressorts en hélice ou « ressorts à boudin ».

— On distingue principalement les ressorts de traction, dont les spires sont souvent jointives et dont la dernière spire forme crochet, et les ressorts de compression dont les spires d'extrémité sont

souvent meulées de façon à réaliser des faces d'appui planes et perpendiculaires à l'axe du ressort. Dans la représentation de ces deux sortes de ressorts, les hélices sont remplacées par des droites et c'est la coupe longitudinale qui est préférée (V. fig. IV-72 à IV-75).

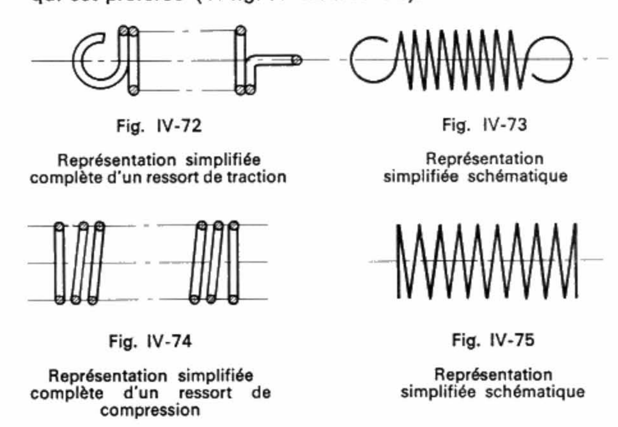


Fig. IV-72 — Représentation simplifiée complète d'un ressort de traction

Fig. IV-73 — Représentation simplifiée schématique

Fig. IV-74 — Représentation simplifiée complète d'un ressort de compression

Fig. IV-75 — Représentation simplifiée schématique

7.3. Représentation simplifiée des soudures. — Conformément aux prescriptions des normes E. 04-020 et E. 04-021, les soudures sont représentées complètement, chaque fois que l'échelle du dessin le permet, aussi bien la soudure autogène par fusion que la soudure autogène par pression. La coupe est hachurée si la soudure est continue, et non hachurée si elle est discontinue. Exemples de soudure autogène par fusion : tôles placées bout à bout (fig. IV-76), tôles perpendiculaires, ou soudure d'angle (fig. IV-77).

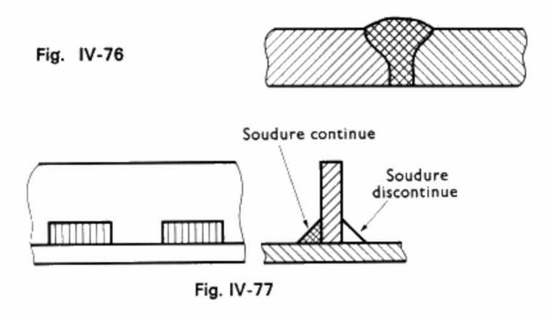


Fig. IV-76

Fig. IV-77

Lorsque l'échelle du dessin est petite et ne permet pas de représenter complètement les soudures, on utilise des symboles qui correspondent à une coupe schématique de l'assemblage. *Exemples :* soudure simple sur bords droits (ouverture de la tôle située en avant, fig. IV-78) ; soudure identique (ouverture située en arrière, fig. IV-79) ; soudure à recouvrement (fig. IV-80).

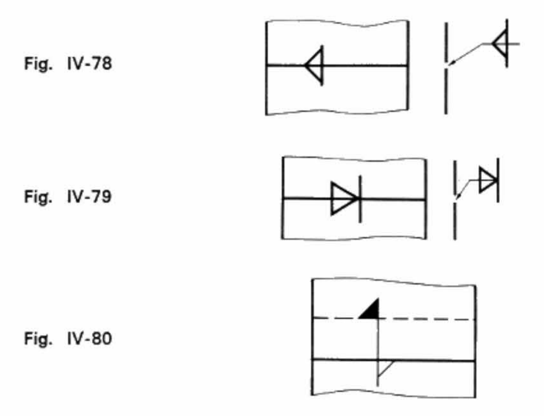


Fig. IV-78

Fig. IV-79

Fig. IV-80

Le symbole utilisé est une section rabattue sur laquelle le côté caché de la tôle est supprimé. On ombre ou on hachure les soudures continues ; on laisse en blanc les soudures discontinues.

Remarque : Le procédé de soudage doit toujours être indiqué sur le dessin par les symboles :

OA : Soudage aux gaz (procédé oxyacétylénique)
G : Soudage aux gaz (autres procédés)
E : Soudage à l'arc électrique
R : Soudage par résistance
H : Soudage à l'hydrogène atomique
EC : Soudage par flux électroconducteur

8. EXEMPLES DE DESSINS

8.1. Dessin de définition de produit fini (fig. IV-81)

8.2. Dessin d'ensemble (fig. IV-82)

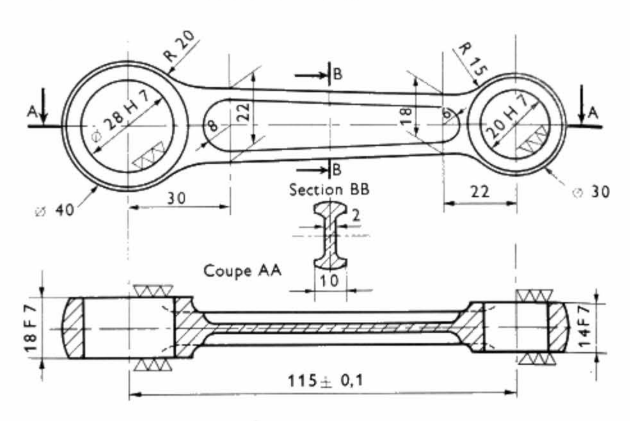
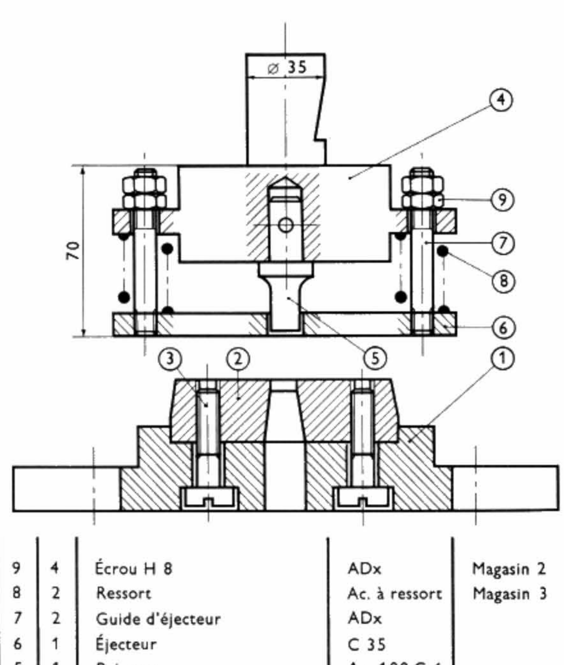


Fig. IV-81



9	4	Écrou H 8	ADx	Magasin 2
8	2	Ressort	Ac. à ressort	Magasin 3
7	2	Guide d'éjecteur	ADx	
6	1	Éjecteur	C 35	
5	1	Poinçon	Ac. 100 C 6	
4	1	Porte-poinçon	C 35	Forgé
6	2	Vis C 8	ADx	Magasin 2
2	1	Matrice	Ac. 100 C 6	
1	1	Socle	Fonte	Mle 2145-1
Rep.	Nb.	Désignation	Matière	Observations

Échelle 1/3	Dessiné par:	Visa:	
OUTIL À DÉCOUPER			S.C.I.M. 23-516

Fig. IV-82

CHAPITRE V

THÉORIE ET PRATIQUE DE LA COTATION FONCTIONNELLE

1. DÉFINITIONS RELATIVES AUX TOLÉRANCES

Le projet de normes PN E. 02-100 de mai 1965 mis en application définit un certain nombre de termes.

1.1. Vocabulaire relatif aux dimensions d'une pièce. — La *dimension effective d'une pièce* est celle qui est réalisée à l'atelier. Les *dimensions limites* sont les deux dimensions extrêmes admissibles entre lesquelles doit se trouver la dimension effective. La *dimension maximale* est la plus grande des deux dimensions limites. La *dimension minimale* est la plus petite des deux dimensions limites. La *dimension nominale* est celle qui sert de référence aux dimensions limites.

1.2. Vocabulaire relatif aux écarts. — L'*écart* est la différence algébrique entre une dimension effective et la dimension nominale. L'*écart supérieur* est la différence algébrique entre la dimension maximale et la dimension nominale. On désigne par *ES* l'écart supérieur d'un alésage, par *es* l'écart supérieur d'un arbre. L'*écart inférieur* est la différence algébrique entre la dimension minimale et la dimension nominale correspondante. On désigne par *EI* l'écart inférieur d'un alésage, par *ei* l'écart inférieur d'un arbre.

1.3. Ligne zéro. — Dans la représentation graphique des tolérances, la ligne zéro est la ligne d'écart nul qui correspond à la dimension nominale. Par convention, lorsque la ligne zéro est tracée horizontalement, les écarts positifs se trouvent représentés au-dessus de cette ligne et les écarts négatifs au-dessous.

1.4. Vocabulaire relatif aux tolérances. — La *tolérance* est la différence entre la dimension maximale et la dimension minimale. C'est aussi la différence algébrique entre l'écart supérieur et l'écart inférieur. La tolérance est une valeur absolue qui n'est pas affectée de signe. La *zone de tolérance*, dans la représentation graphique des tolérances, est la zone comprise entre les lignes représentant les limites de la tolérance. Elle est définie en grandeur (tolérance) et en position par rapport à la ligne zéro.

1.5. Qualité. — Dans un système normalisé, c'est l'ensemble des tolérances qui correspondent à un même degré de précision pour toutes les dimensions.

2. DÉFINITIONS RELATIVES AUX AJUSTEMENTS

Le projet de norme PN E. 02-100, mentionné précédemment, définit également un certain nombre de termes relatifs aux ajustements.

L'*arbre* désigne toute dimension extérieure d'une pièce, qu'elle soit cylindrique ou non. L'*alésage* désigne toute dimension intérieure d'une pièce, qu'elle soit cylindrique ou non. Dans le système ISO de tolérances et d'ajustements, l'*arbre normal* est l'arbre dont l'écart supérieur est nul. L'*alésage normal* est l'alésage dont l'écart inférieur est nul. L'*ajustement* est une relation qui résulte de la différence des dimensions de deux pièces destinées à être assemblées. La *dimension nominale* est la valeur de la dimension nominale commune aux deux éléments de l'ajustement. La différence entre les dimensions effectives de l'alésage et de l'arbre est appelée *jeu* si elle est positive et *serrage* si elle est négative.

L'*ajustement* dit *avec jeu* présente toujours un jeu. L'*ajustement* dit *avec serrage* présente toujours un serrage. L'*ajustage incertain* peut présenter, soit un jeu, soit un serrage, suivant les dimensions effectives des pièces d'une série. Le *jeu minimal* d'un ajustement avec jeu est la différence entre la dimension minimale de l'alésage et la dimension maximale de l'arbre. Le *jeu maximal* d'un ajustement avec jeu ou d'un ajustement incertain est la différence entre la dimension maximale de l'alésage et la dimension minimale de l'arbre. Le *serrage minimal* d'un ajustement avec serrage est la valeur absolue de la différence entre la dimension maximale de l'alésage et la dimension minimale de l'arbre, avant assemblage. Le *serrage maximal* d'un ajustement avec serrage ou d'un ajustement incertain est la valeur absolue de la différence entre la dimension minimale de l'alésage et la dimension maximale de l'arbre, avant assemblage.

3. RELATIONS MATHÉMATIQUES ENTRE LES DIFFÉRENTS TERMES

3.1. Expressions relatives aux écarts (fig. V-1). — Écart supérieur de l'alésage ou du contenant :

ES = cote maximale — cote nominale (ici ES est positif).

Écart inférieur de l'alésage ou du contenant :

EI = cote minimale — cote nominale (ici EI est positif).

De même pour l'arbre ou le contenu :

es = cote maximale — cote nominale (ici es est négatif),

ei = cote minimale — cote nominale (ici ei est négatif).

Remarques : 1° Les écarts sont des nombres algébriques. 2° On aura $ES > EI$ si ces deux nombres sont positifs et $es > ei$ si ces deux nombres sont négatifs (de deux nombres négatifs, le plus grand étant celui qui a la plus petite valeur absolue).

3.2. La condition à installer entre deux pièces *A* et *B* que l'on doit assembler est un jeu ou un serrage. On appelle J_{max} le jeu maximal et j_{min} le jeu minimal. Quel que soit le signe (positif ou négatif) des écarts, on aura les relations suivantes (fig. V-1) :

$$J_{max} = ES - ei \quad (1)$$

et :

$$j_{min} = EI - es \quad (2)$$

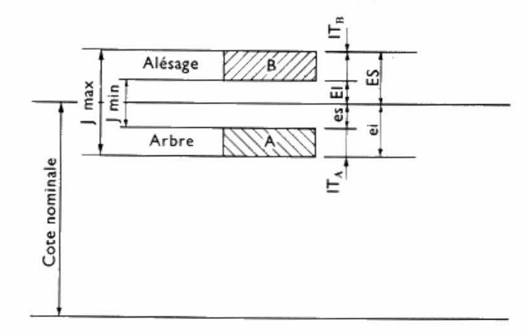


Fig. V-1 — Définitions relatives aux tolérances

En retranchant membre à membre les relations (1) et (2) il vient :

$$J_{max} - j_{min} = ES - ei - EI + es$$

soit :

$$J_{max} - j_{min} = (ES - EI) + (es - ei)$$

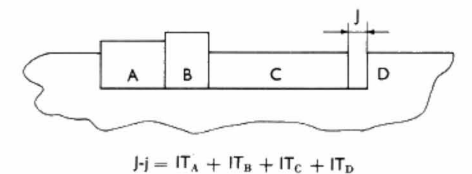
d'où :

$$\boxed{J_{max} - j_{min} = IT_B + IT_A}$$

si l'on désigne par IT_B l'intervalle de tolérance pour l'alésage (pièce *B*) et par IT_A l'intervalle de tolérance pour l'arbre (pièce *A*).

Cette relation est fondamentale : elle établit que la tolérance sur le jeu de l'assemblage est égale à la somme des tolérances sur les deux pièces assemblées. Dans le cas d'un

assemblage de plusieurs pièces on démontre de même que la tolérance sur le jeu résultant est égale à la somme des tolérances sur les pièces composant l'assemblage (fig. V-2) : $J_{max} - j_{min} = IT_A + IT_B + IT_C + IT_D$.



$J - j = IT_A + IT_B + IT_C + IT_D$

Fig. V-2 — Relation entre jeu et tolérances

Dans le cas d'un serrage ou d'un assemblage incertain on vérifie de même, pour la condition à installer, la relation similaire :

$$S_{max} - s_{min} = IT_A + IT_B + IT_C + IT_D$$

si l'on désigne par S_{max} le serrage maximal et s_{min} le serrage minimal.

4. CALCUL DES TOLÉRANCES PAR LA MÉTHODE DES LIMITES

4.1. Relations fondamentales. — Quelle que soit la condition à installer : jeu, serrage ou ajustement indéterminé, on dispose des deux *équations fondamentales* suivantes (fig. V-3) :

$$J_{max} = \text{contenant maximal} - \text{contenu minimal} = b_{max} - a_{min} \quad (1)$$

$$j_{min} = \text{contenant minimal} - \text{contenu maximal} = b_{min} - a_{max} \quad (2)$$

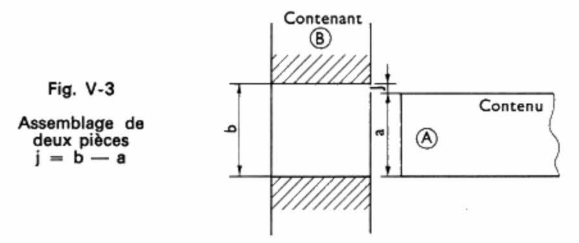


Fig. V-3

Assemblage de deux pièces
$j = b - a$

4.2. Résolution des problèmes. — La solution d'un problème de recherche des tolérances n'est généralement possible que si le nombre des inconnues n'est pas supérieur à deux car on ne dispose que des deux relations précédentes (1) et (2).

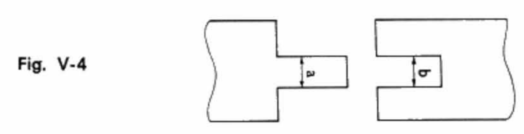
1° *Problème du premier type :* on connaît ou on se fixe les limites des cotes *a* et *b* (V. fig. V-3). On recherche les limites de la condition, c'est-à-dire le jeu ou serrage maximal, ainsi que le jeu ou serrage minimal.

2° *Problème du deuxième type :* on connaît les limites de l'une des cotes *a* ou *b* (V. fig. V-3) ; on connaît ou l'on se fixe également les limites de la condition. On recherche, dans ce cas, les limites de la cote inconnue *a* ou *b*.

4.3. Exemples :

1° *Problème du premier type :* l'assemblage avec jeu représenté par la figure V-4, comporte un tenon et une

Fig. V-4



mortaise. On connaît les cotes *a* et *b* et leurs tolérances :

$$a = 40^{-0,2}_{-0,4} \quad \text{soit : } IT_a = 0,2$$

et : $$b = 40^{+0,2}_{+0} \quad \text{soit : } IT_b = 0,2$$

Calcul des limites des cotes *a* et *b* :

$$a_{max} = 40 - 0,2 = 39,8$$

et : $$a_{min} = 40 - 0,4 = 39,6$$

De même : $$b_{max} = 40 + 0,2 = 40,2$$

$$b_{min} = 40 + 0 = 40$$

Les équations fondamentales (1) et (2) indiquées précédemment permettent d'écrire :

$$J_{max} = b_{max} - a_{min} = 40,2 - 39,6 = 0,6$$

et $$j_{min} = b_{min} - a_{max} = 40 - 39,8 = 0,2$$

Vérification : on doit avoir $J_{max} - j_{min} = IT_a + IT_b$ effectivement : $0,6 - 0,2 = 0,2 + 0,2 = 0,4$

2° *Problème du deuxième type :* on considère la figure V-4 utilisée dans l'exemple précédent. Dans le cas présent on se fixe la condition :

$$0,1 \leqslant J \leqslant 0,4 \quad (\text{soit } J_{max} = 0,4 \text{ et } j_{min} = 0,1)$$

On connaît ou on se fixe également les limites de l'élément *a*, soit par exemple :

$$a = 40^{-0}_{-0,1} \quad (\text{soit } a_{max} = 40 \text{ et } a_{min} = 39,9)$$

En premier lieu, il est prudent de vérifier si les données sont compatibles, sinon le problème ne peut admettre de solution. On doit avoir :

$$J_{max} - j_{min} = IT_a + IT_b$$

ici : $$J_{max} - j_{min} = 0,4 - 0,1 = 0,3$$

par ailleurs : $$IT_a = 0 - (-0,1) = 0,1$$

par suite : $$0,3 = 0,1 + IT_b$$

$$IT_b = 0,3 - 0,1 = 0,2$$

Le problème admet une solution. On va calculer les limites maximale et minimale de la cote *b*.

Équations fondamentales (1) et (2) :

$$J_{max} = b_{max} - a_{min}$$

$$0,4 = b_{max} - 39,9$$

d'où : $$b_{max} = 0,4 + 39,9 = \mathbf{40,3}$$

et : $$j_{min} = b_{min} - a_{max}$$

$$0,1 = b_{min} - 40$$

d'où : $$b_{min} = 0,1 + 40 = \mathbf{40,1}$$

On obtient donc les tolérances suivantes : $b = 40^{+0,3}_{+0,1}$ et : $IT_b = 0,2$.

Vérification : On vérifie que $J_{max} - j_{min} = IT_a + IT_b$.
Effectivement : $0,4 - 0,1 = 0,1 + 0,2 = 0,3$.

5. CHAÎNE DE COTES

5.1. Définitions. — Une chaîne de cotes est l'ensemble des cotes qui installent une condition : jeu ou serrage définis par les valeurs minimales et maximales. Une chaîne de cotes correctement établie doit permettre les plus larges tolérances compatibles avec le respect de la condition imposée. En principe, une chaîne de cotes ne doit comporter qu'une seule cote par pièce.

Exemple (fig. V-5) : la condition à installer est un jeu entre les surfaces terminales *S* et *S'* des pièces *A* et *B* assemblées sur la pièce *C*.

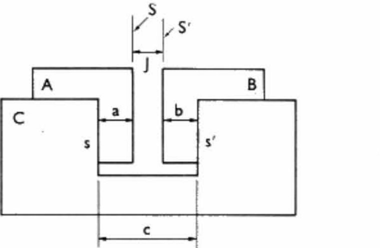


Fig. V-5

Surfaces terminales et surfaces d'appui

— Les surfaces *s* et *s'* sont appelées **surfaces d'appui.**
— Les surfaces *S, S', s, s'* sont désignées sous le nom de **surfaces fonctionnelles.**

— Les cotes *a*, *b*, *c* sont des **cotes fonctionnelles** pour chacune des trois pièces *A*, *B*, *C*. Le montage représenté figure V-5, comporte trois pièces, la chaîne minimale comprend trois cotes fonctionnelles ou **trois maillons.**

5.2. Conventions pour l'établissement d'une chaîne de cotes. — On choisit deux axes de coordonnées *Ox* et *Oy* (fig. V-6) dont les sens positifs sont précisés.

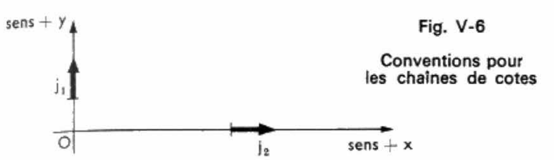


Fig. V-6

Conventions pour les chaînes de cotes

1° Le vecteur *j* est toujours pris dans le sens positif. Il peut être pris dans le sens horizontal (axe *Ox*) ou dans le sens vertical (axe *Oy*) suivant la direction générale horizontale ou verticale des cotes qui constituent la chaîne.

2° L'établissement de la chaîne de cotes est faite en traçant des vecteurs qui ont le vecteur *j* pour résultante. Ces vecteurs sont des maillons de la chaîne.

3° En règle générale, les vecteurs de sens positif constituent le contenant et les vecteurs de sens négatif constituent le contenu (ou éléments mâles de l'assemblage).

D'après les conventions précédentes, il résulte que la chaîne de cotes est une chaîne vectorielle. L'origine de cette chaîne est confondue avec l'origine du vecteur condition. L'extrémité de la chaîne est confondue avec l'extrémité du vecteur condition. La chaîne de cotes se trouve être en conséquence composée de vecteurs qui relient les faces de chaque pièce.

5.3. Relation caractéristique. — On désigne sous le nom de relation caractéristique, la relation qui existe entre la condition et les cotes composantes. Dans le cas de la figure V-7, la relation caractéristique de l'assemblage s'écrit :

$$J = c - b - a$$

avec *c* cote fonctionnelle du contenant (signe positif) *b* et *a* cotes fonctionnelles du contenu (signe négatif).

On se propose de déterminer les jeux maximal *J* et minimal *j*, c'est-à-dire les limites de la condition. Équations fondamentales :

$$J_{max} = b_{max} + d_{max} - c_{min} - a_{min} \quad (1)$$
$$j_{min} = b_{min} + d_{min} - c_{max} - a_{max} \quad (2)$$

or :
$$\begin{cases} a_{max} = 45{,}1 \\ a_{min} = 44{,}9 \end{cases} \quad \begin{cases} b_{max} = 40 \\ b_{min} = 39{,}9 \end{cases}$$
$$\begin{cases} c_{max} = 20{,}15 \\ c_{min} = 20 \end{cases} \quad \begin{cases} d_{max} = 25 \\ d_{min} = 24{,}9 \end{cases}$$

par suite :
$$J_{max} = 40 + 25 - 20 - 44{,}9 = 0{,}1$$
$$j_{min} = 39{,}9 + 24{,}9 - 20{,}15 - 45{,}1 = -0{,}45$$

donc :
$$-0{,}45 \leqslant j \leqslant 0{,}1$$

Remarques :

1° j_{min} a une valeur négative. Cela signifie qu'il s'agit en réalité d'un serrage de valeur $s = -0{,}45$. C'est la condition minimale, la condition maximale étant un jeu de 0,1. L'assemblage est donc du type « incertain ».

2° On peut vérifier ce calcul en appliquant la formule :

$$J_{max} - j_{min} = \Sigma IT$$

Ici : $J_{max} - j_{min} = 0{,}1 - (-0{,}45) = 0{,}55$

et : $IT_a + IT_b + IT_c + IT_d = 0{,}2 + 0{,}1 + 0{,}15 + 0{,}1 = 0{,}55.$

Donc on a bien :

$$J_{max} - j_{min} = IT_a + IT_b + IT_c + IT_d$$

6.2. Deuxième problème. — Étude d'une commande d'avances pour machine-outil (fig. V-9 a et b). Les cotes fonctionnelles *a*, *c*, *d*, entre les surfaces d'appui s_1, s_2, s_3 sont connues ainsi que leurs tolérances respectives. Un fonctionnement correct (rotation de l'arbre *B* par rapport au

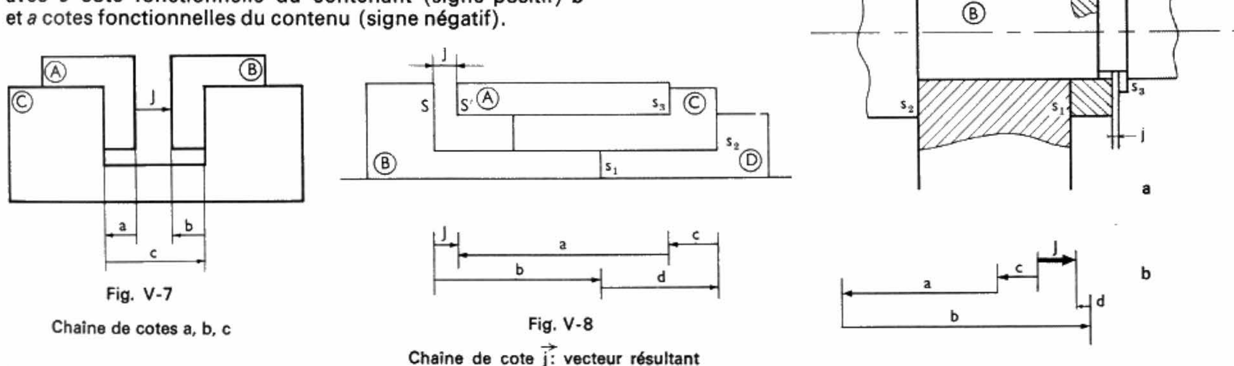


Fig. V-7

Chaîne de cotes a, b, c

Fig. V-8

Chaîne de cote $\vec{j}$: vecteur résultant

Fig. V-9

Application à une commande d'avances

6. APPLICATIONS

6.1. Premier problème. — La figure V-8 représente quatre pièces assemblées *A*, *B*, *C*, *D* devant présenter entre les surfaces terminales *S* et *S'* le jeu : *j*. L'analyse technique permet de repérer les surfaces d'appui des différentes pièces (s_1 entre *B* et *D*, s_2 entre *C* et *D* et s_3 entre *A* et *C*). La chaîne de cotes *a*, *b*, *c* est tracée (fig. V-8) en observant les conventions indiquées ci-dessus. *a*, *b*, *c*, *d* sont les cotes fonctionnelles qui installent la condition *J* ; *b* et *d* sont des contenants (vecteurs orientés positivement) ; *a* et *c* sont des contenus (vecteurs orientés négativement).

La relation caractéristique s'écrit : $J = b + d - c - a.$

On suppose que les cotes fonctionnelles *a*, *b*, *c*, *d* sont connues ainsi que leurs tolérances. Par exemple :

$$a = 45^{+0{,}1}_{-0{,}1} \qquad c = 20^{+0{,}15}_{+0}$$
$$b = 40^{-0}_{-0{,}1} \qquad d = 25^{-0}_{-0{,}1}$$

bâti *A*) permet de fixer les limites de la condition. On adoptera : $J_{max} = 0{,}35$; $j_{min} = 0{,}05$. On se propose de calculer la cote fonctionnelle de l'arbre *b* ainsi que sa tolérance IT_b et ses écarts *es* et *ei*. On vérifie tout d'abord si les données sont compatibles afin que le problème puisse admettre une solution. Dans ce cas, on vérifie que :

$$J_{max} - j_{min} = \Sigma IT = IT_a + IT_b + IT_c + IT_d \geqslant IT_a + IT_c + IT_d$$
$$J_{max} - j_{min} = 0{,}35 - 0{,}05 = 0{,}30$$

Pour cotes fonctionnelles des pièces *A*, *C*, *D* on adopte les valeurs suivantes :

$$a = 39^{-0}_{-0{,}1} ; \quad c = 6^{-0}_{-0{,}05} ; \quad d = 1{,}2^{-0}_{-0{,}05}$$
$$IT_a + IT_c + IT_d = 0{,}1 + 0{,}05 + 0{,}05 = 0{,}20$$

Comme $J_{max} - j_{min} = 0{,}30$ est supérieur à 0,2, le problème admet une solution. De plus, la tolérance sur la cote *b* aura pour valeur :

$$0{,}30 - 0{,}2 = \mathbf{0{,}1}$$

On va chercher les écarts relatifs à la cote *b*. L'analyse technique permet de construire la chaîne de cotes qui installe le jeu *J* (V. fig. V-9 b), d'après les conventions indiquées précédemment : $J = b - d - c - a$.

Équations fondamentales :

1° $J_{max} = b_{max} - d_{min} - c_{min} - a_{min}$

d'où : $b_{max} = J_{max} + d_{min} + c_{min} + a_{min}$

$b_{max} = 0{,}35 + 1{,}15 + 5{,}95 + 38{,}90 = \mathbf{46{,}35}$

2° $j_{min} = b_{min} - d_{max} - c_{max} - a_{max}$

$b_{min} = j_{min} + d_{max} + c_{max} + a_{max}$

$b_{min} = 0{,}05 + 1{,}2 + 6 + 39 = \mathbf{46{,}25}$

Finalement on trouve les écarts de la cote *b* :

$$b = 46 \begin{matrix} +\ 0{,}35 \\ +\ 0{,}25 \end{matrix}$$

et : $IT_b = es - ei = 0{,}35 - 0{,}25 = 0{,}10$

Vérification :

$$J_{max} - j_{min} = 0{,}35 - 0{,}05 = 0{,}30$$

$$\Sigma\, IT = IT_a + IT_b + IT_c + IT_d$$

$$= 0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}05 + 0{,}05 = 0{,}30$$

La relation $J_{max} - j_{min} = \Sigma\, IT$ est bien vérifiée.

7. COTATION FONCTIONNELLE DES SURFACES OBLIQUES ET DES SURFACES CONIQUES

Dans les cas étudiés jusqu'à présent on n'a considéré que la cotation entre surfaces planes et parallèles. Or, dans de nombreux cas, les surfaces terminales se présentent obliquement l'une par rapport à l'autre, ou bien les pièces s'assemblent par l'intermédiaire de surfaces coniques.

7.1. Cotation des surfaces obliques

7.1.1. Détermination d'un plan incliné (fig. V-10). — On définit un plan incliné par l'indication de son inclinaison par rapport à un plan de référence PR_1, soit au moyen de sa pente, soit au moyen de l'angle formé avec ce plan de référence. La position du plan incliné est définie par la position d'une section droite, appelée *plan de jauge*, par rapport à un autre plan de référence, PR_2, perpendiculaire au premier. La cote *b* permet de situer la position du plan de jauge. La cote *a*, non tolérancée parce qu'il s'agit d'une cote de construction, permet de définir la position du plan incliné. Elle sera encadrée sur le dessin.

7.1.2. Cotation d'un assemblage (fig. V-11). — Soit à coter en forme et en position les deux pièces assemblées *A* et *B*, par rapport à la pièce *D*. Les plans inclinés étant des surfaces fonctionnelles complémentaires, leurs pentes devront être égales et la tolérance d'inclinaison doit être compatible avec les exigences de précision de l'assemblage. La position des pièces *A* et *B* par rapport à la pièce *D* est définie par celle du plan de jauge, soit par la cote *d*. Les cotes $\boxed{a_1}$ et $\boxed{a_2}$ indiquent la largeur de jauge (elles sont encadrées pour la raison indiquée précédemment). Les positions des faces extrêmes des pièces *A* et *B* sont repérées au moyen des cotes c_1, c_2 pour *A*, et b_1, b_2 pour *B*.

7.2. Cotation des surfaces coniques

7.2.1. Détermination d'une surface conique (fig. V-12). — On définit la forme d'une surface conique au moyen de son axe géométrique et de l'angle au sommet du cône, ou par la valeur de la conicité. Comme dans le cas du plan incliné, sa position est définie au moyen d'un *plan de jauge*. On choisit un plan de référence perpendiculaire à l'axe du cône (surface fonctionnelle) et l'on cote la distance qui sépare le plan de jauge du plan de référence. La valeur du diamètre de jauge doit être encadrée pour montrer qu'il s'agit d'une cote de construction, non tolérancée. Pour faciliter le contrôle on peut matérialiser le plan de jauge au moyen d'un calibre de vérification.

7.2.2. Cotation d'un assemblage conique. — Dans l'assemblage conique représenté figure V-13, les surfaces coniques doivent coïncider ; par conséquent, elles doivent

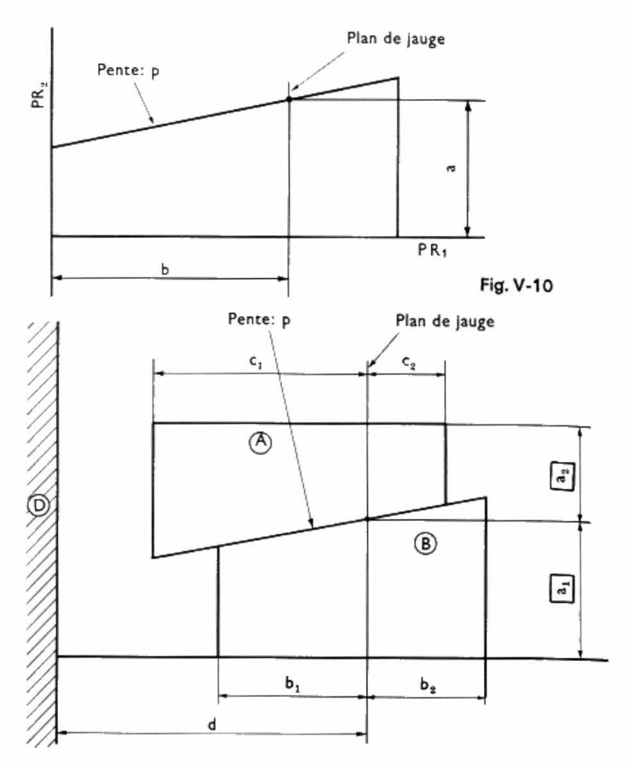


Fig. V-11 — Cotation d'un assemblage

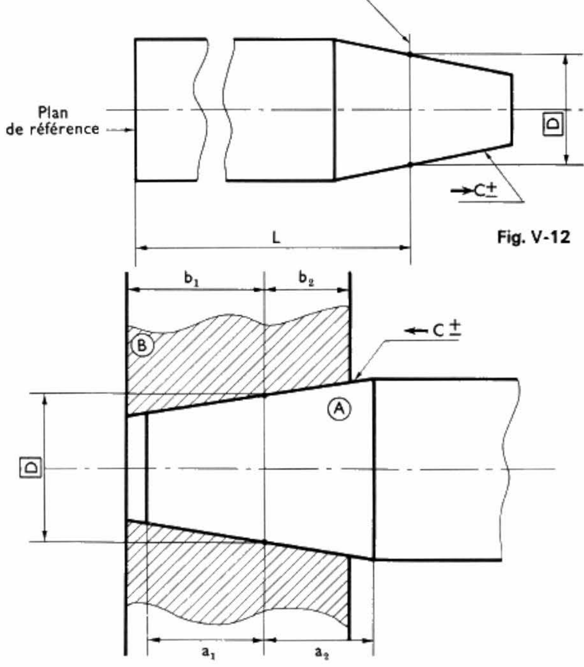


Fig. V-13 — Cotation d'un assemblage conique

avoir la même ouverture définie avec une tolérance compatible avec les exigences de précision du montage. On doit indiquer généralement une tolérance de conicité. Le diamètre de jauge est le même pour les deux cônes conjugués ; lorsque les pièces seront assemblées, si l'on néglige les déformations élastiques dues au serrage, les plans de jauge coïncident. La position des bases des deux troncs de cône est définie au moyen de leurs distances respectives au plan de jauge pour chacune des deux pièces.

Remarque : Dans l'étude qui précède on a négligé les déformations élastiques dues au serrage. En réalité, pour

les assemblages coniques à faible conicité, le serrage peut provoquer un dépassement sensible du plan de jauge de la pièce A par rapport à celui de la pièce B. Il est prudent de tenir compte de ce phénomène dans le choix des tolérances des cotes a_1, a_2, b_1 et b_2 qu'il faut prendre aussi grandes que possible.

7.2.3. Chaîne des cotes pour un assemblage conique (fig. V-14). — On considère l'assemblage constitué par les trois pièces A, B, C ; on donne les limites de la condition qui est ici un jeu entre les surfaces terminales S et S' des pièces A et C. Soit $J = 2 \pm 0{,}6$ cette valeur.

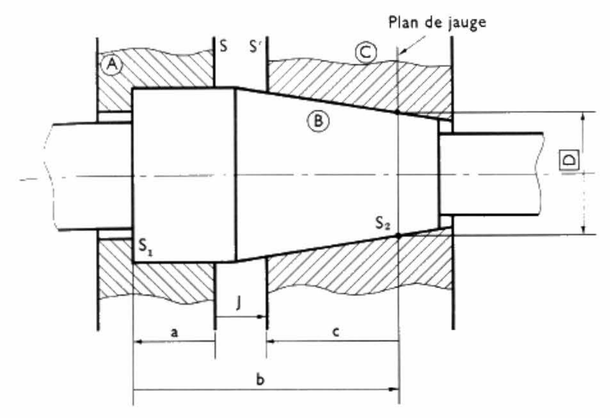


Fig. V-14 — Chaîne de cotes dans un assemblage conique

Par ailleurs on connaît les limites des cotes a et b des pièces A et B. Soient $a = 6^{\,-0}_{\,-0{,}1}$ et $b = 20 \pm 0{,}3$ ces valeurs. On veut calculer la cote nominale c avec ses limites.

Solution. — Si l'on considère que le plan de jauge constitue une surface d'appui S_2, commune aux deux pièces B et C on se trouve ramené au problème habituel de chaîne de cotes entre faces parallèles. On peut donc tracer la chaîne constituée par les maillons $a\,b\,c$ qui a J pour valeur résultante.

Relation caractéristique : $J = b - c - a$.

Valeur nominale de la cote c :

$$c = b - a - J = 20 - 6 - 2 = 12$$

Relations caractéristiques :

$$J_{\max} = b_{\max} - c_{\min} - a_{\min} \quad (1)$$
$$j_{\min} = b_{\min} - c_{\max} - a_{\max} \quad (2)$$

On a ici :

$$\begin{cases} a_{\max} = 6 \\ a_{\min} = 5{,}9 \end{cases} \quad \begin{cases} b_{\max} = 20{,}3 \\ b_{\min} = 19{,}7 \end{cases} \quad \begin{cases} J_{\max} = 2{,}6 \\ j_{\min} = 1{,}4 \end{cases}$$

La relation (1) s'écrit : $2{,}6 = 20{,}3 - C_{\min} - 5{,}9$

d'où : $C_{\min} = 20{,}3 - 5{,}9 - 2{,}6 = \mathbf{11{,}8}$

La relation (2) s'écrit : $1{,}4 = 19{,}7 - C_{\max} - 6$

d'où : $C_{\max} = 19{,}7 - 6 - 1{,}4 = \mathbf{12{,}3}$

donc : $c = 12^{\,+0{,}3}_{\,-0{,}2}$ et la tolérance sur c est égale à :

$$IT_C = 0{,}3 + 0{,}2 = 0{,}5$$

Vérification :

$$J_{\max} - j_{\min} = 0{,}6 + 0{,}6 = \mathbf{1{,}2}$$

et : $IT_a + IT_b + IT_c = 0{,}1 + 0{,}6 + 0{,}5 = \mathbf{1{,}2}$

La relation $J_{\max} - j_{\min} = \Sigma\, IT$ est bien vérifiée.

8. ASSEMBLAGES AVEC PÉNÉTRATION

Dans les assemblages avec pénétration, lorsqu'un jeu existe, il y a lieu de tenir compte du sens de l'effort exercé sur les pièces, l'appui pouvant s'inverser sur les faces en contact. La figure V-15 montre que l'on peut rencontrer trois cas différents :

— l'effort peut être appliqué constamment dans le sens F_1 : l'appui se fera toujours sur la face S ;

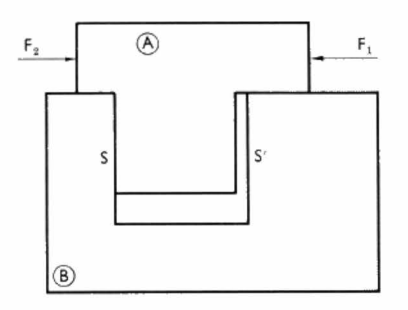


Fig. V-15

— l'effort peut être appliqué constamment dans le sens F_2 : l'appui aura toujours lieu sur la face S' ;

— la pièce peut être libre : elle peut prendre toutes les positions situées entre les faces S et S'.

Il y a donc lieu de tenir compte de ces éléments dans l'identification des surfaces fonctionnelles. Deux cas peuvent se produire : la pénétration avec serrage et la pénétration avec jeu.

8.1. Pénétration avec serrage. — L'assemblage représenté figure V-16 comporte une pige assemblée avec serrage dans les pièces A et B. Dans le cas de pénétration

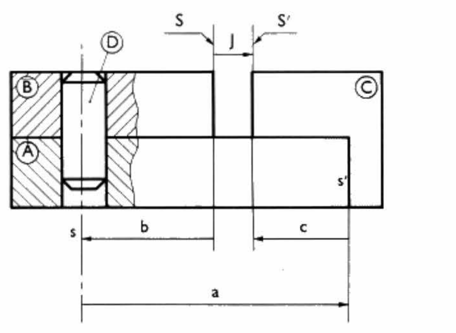


Fig. V-16

Pénétration avec serrage

avec serrage il y a donc coaxialité du contenant et du contenu. On doit prendre alors comme surface d'appui (s) le plan diamétral de la pièce D. Cette particularité conduit à adopter pour cotes fonctionnelles : la cote a pour A ; la cote b pour B ; la cote c pour C, prise à partir de la surface s'. La chaîne de cotes qui installe la condition J comportera seulement les trois maillons $a\,b\,c$, le diamètre de D n'intervenant pas.

8.2. Pénétration avec jeu (fig. V-17). — On considère seulement le cas où le sens de la sollicitation sur la pièce B est indéterminé et peut intervenir, soit dans le sens F_1, soit dans le sens F_2.

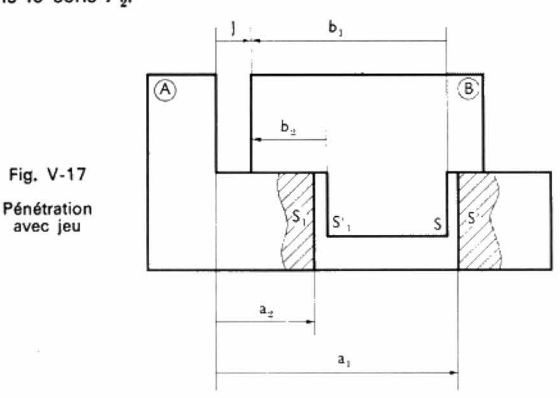


Fig. V-17

Pénétration avec jeu

On va calculer les valeurs maximale et minimale du jeu. On a : $J_{\max} = a_{1\max} - b_{1\min}$ (avec contact de S sur S') et : $j_{\min} = a_{2\min} - b_{2\max}$ (avec contact de S_1 sur S'_1). Dans ce cas, pour les deux pièces assemblées A et B, quatre cotes fonctionnelles interviennent, chacune d'elles n'intervenant qu'avec une seule de ses limites : pour A : $a_{1\max}$ et $a_{2\min}$; pour B : $b_{1\min}$ et $b_{2\max}$.

9. COTATION DE LA POSITION D'UN AXE

Cette cotation est régie par la norme FD E. 04-019 qui précise que la distance entre deux axes parallèles, ou entre un axe et des plans parallèles à cet axe, s'exprime en valeur nominale par une différence de coordonnées dans deux directions orthogonales.

Selon les conditions de fonctionnement on peut procéder, soit :

1° Par inscription, immédiatement à la suite de deux cotes nominales (fig. V-18). L'axe doit alors rester compris à l'intérieur d'une zone parallélépipédique de section carrée ou rectangulaire. Cette méthode est généralement employée pour la cotation d'un axe par rapport à deux faces planes, ou pour la cotation de plusieurs axes parallèles dont les entraxes sont alignés.

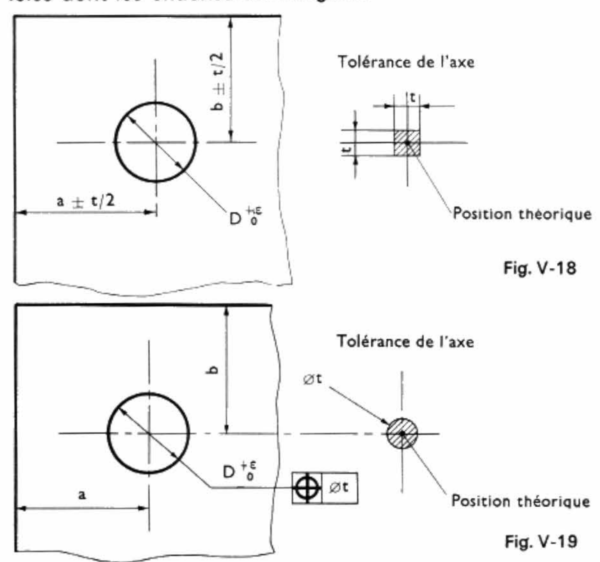


Fig. V-18

Fig. V-19

2° Par l'indication d'une tolérance de position t, autour d'une position théorique définie sans tolérance pour les deux cotes nominales qui doivent être encadrées (fig. V-19). L'axe doit alors rester situé à l'intérieur d'une zone cylindrique de diamètre égal à la tolérance t, et coaxiale à la position théorique. Cette méthode est généralement employée pour la cotation des positions respectives de plusieurs axes parallèles, disposés de façon quelconque les uns par rapport aux autres.

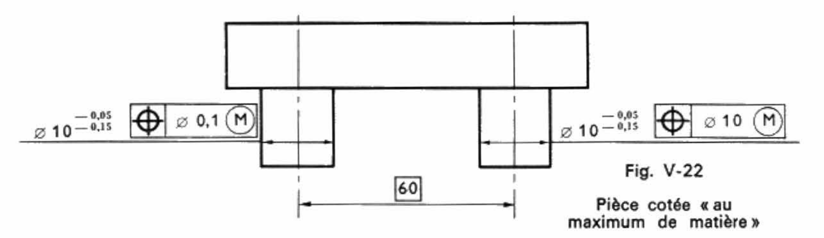


Fig. V-22

Pièce cotée « au maximum de matière »

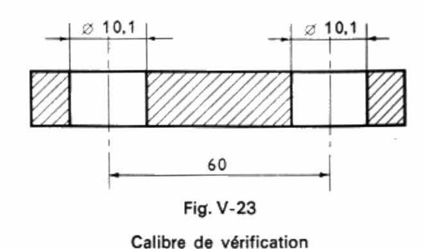


Fig. V-23

Calibre de vérification

10. COTATION DITE « AU MAXIMUM DE MATIÈRE »

Cette cotation s'applique à deux pièces conjuguées dont tous les arbres de l'une doivent s'assembler simultanément avec tous les alésages de l'autre. Étant donné les deux pièces représentées figure V-20, il y a deux cas limites de montages.

1° a maximale et a' minimale avec b maximale et b' minimale (fig. V-20).

2° a minimale et a' maximale avec, comme précédemment, b maximale et b' minimale (fig. V-21).

Dans ces deux cas, l'arbre et l'alésage sont au *maximum de matière*. La figure V-20 montre que le montage est également possible si la cote a, effectivement réalisée, est supérieure au maximum prévu, à condition que la cote b effective soit de son côté inférieure à son maximum prévu,

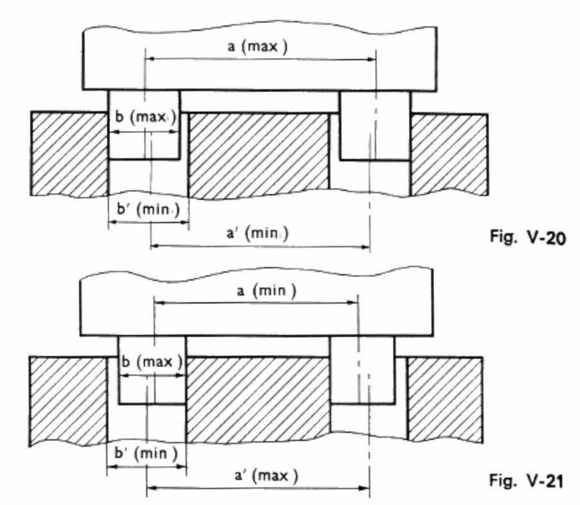


Fig. V-20

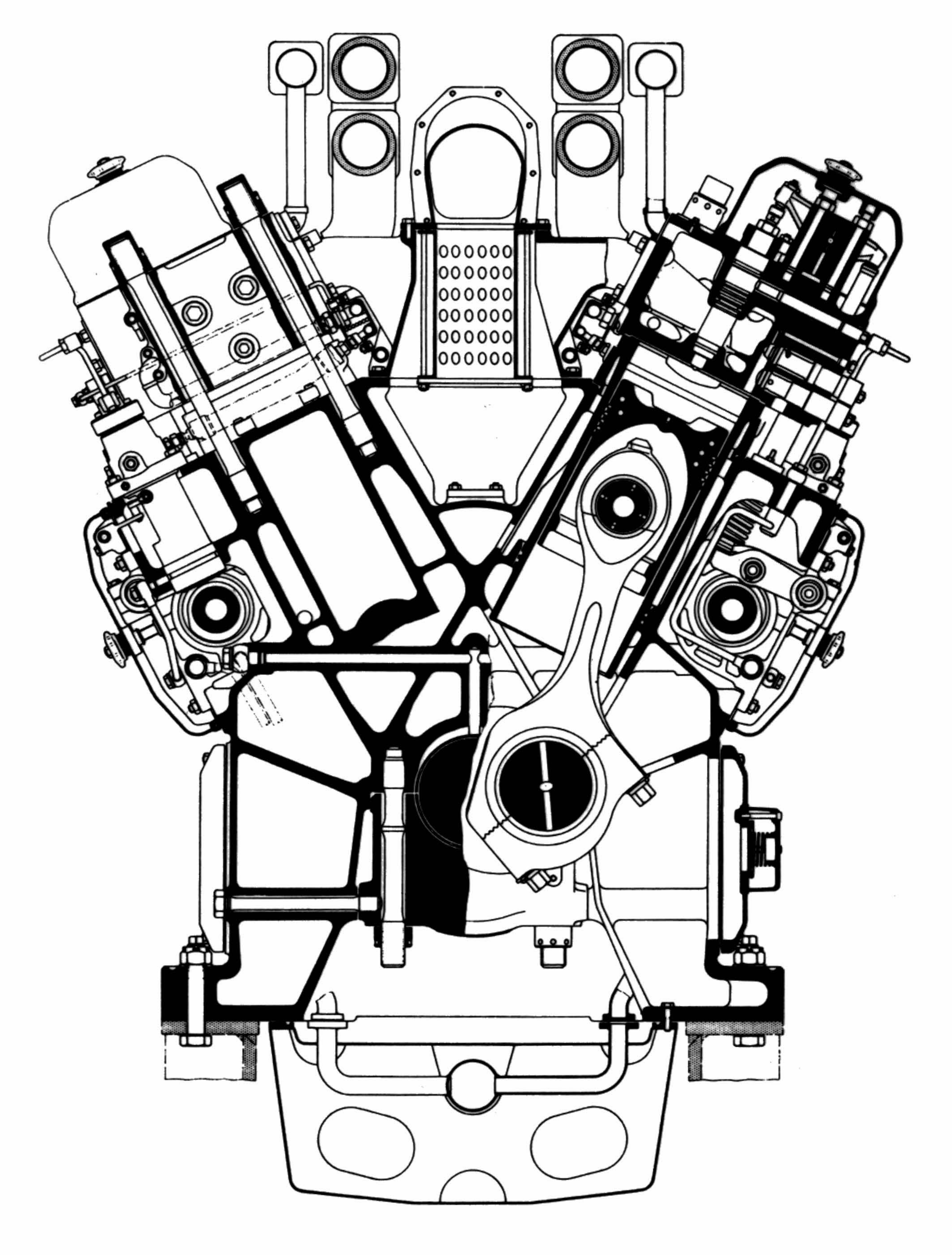
Fig. V-21

ce qui est le cas le plus souvent. De même la figure V-21 montre que l'assemblage est également possible si la cote a effectivement réalisée est inférieure au minimum prévu, à condition que la cote b effective soit elle-même inférieure à sa cote maximale. On voit donc que les cotes limites de a ne sont impératives que si la cote b est maximale, et si b' est minimal. En conséquence, si l'arbre et l'alésage ne sont pas à leur maximum de matière, la tolérance de l'entraxe a peut être augmentée sans inconvénients pour l'assemblage de la différence existant entre b maximum et b effectif.

Symbole de cotation « au maximum de matière ». On inscrit le symbole *M* à la suite de la tolérance de position t de l'axe d'une surface cylindrique de diamètre maximal D (fig. V-22). L'indication *M* signifie que la tolérance de position t de l'axe n'est impérative que si le diamètre est à son maximum de matière. Dans le cas contraire, la tolérance de position peut être dépassée, de la différence entre le diamètre maximal D et le diamètre effectivement réalisé. La seule condition fonctionnelle imposée par cette notation consiste à exiger de laisser libre de matière, une zone cylindrique exactement centrée sur la position théorique de l'axe et comprise, s'il s'agit d'un arbre, à l'extérieur d'un cylindre de diamètre $D + t$. Cette remarque permet d'effectuer le contrôle des pièces à la réception, au moyen d'un calibre du type « entre » dont les surfaces cylindriques sont exactement centrées sur les positions théoriques et ayant pour diamètre, s'il s'agit d'un arbre, la somme $D + t$. Un exemple de pièce cotée au *maximum de matière* est représenté sur la figure V-22. Son calibre de vérification du type « entre » est représenté sur la figure V-23. Le diamètre des trous doit être égal à $D + t$ soit $10 + 0{,}1 = 10{,}1$.

11. TRANSFERT DE COTES

L'étude des chaînes de cotes fonctionnelles conduit, ainsi qu'on l'a vu, à adopter pour chaque pièce une série de cotes affectées des tolérances maximales autorisées par le fonctionnement ou le montage. Mais ce système de cotation ne tient cependant pas compte de la gamme d'usinage ni des méthodes de vérification mises en œuvre à la réception des pièces usinées. Le dessin de définition de produit fini élaboré par le bureau d'études passe ensuite au bureau des méthodes chargé de préparer la



Document Sulzer **Calque original**

fabrication. À partir du dessin de produit fini, les préparateurs du bureau des méthodes ont donc à déterminer: 1° la gamme d'usinage, ou ordre des opérations successives de fabrication; 2° les machines-outils et l'outillage qui devront être utilisés; 3° les montages d'usinage à utiliser; ils devront éventuellement être fabriqués; 4° le matériel destiné au contrôle des pièces, matériel standard ou à mettre au point.

Exemple de transfert: Si le bureau d'études a établi le dessin de définition de la pièce (fig. V-24) qui comporte les cotes fonctionnelles *a*, *b* et *c* et que le préparateur prévoit l'exécution de l'entaille au moyen d'une fraise travaillant en butée, cas du travail en série, les cotes nécessaires à la fabrication sont (fig. V-25): *b*: cote en butée, cote fonctionnelle prise à partir du plan de référence *PR*; *d*: largeur de la fraise, cote non fonctionnelle; *c*: pro-

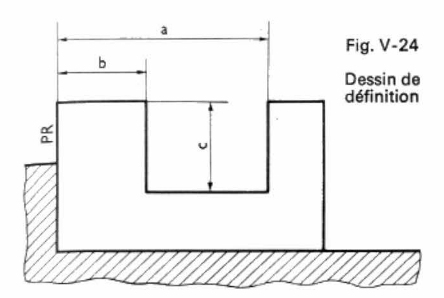


Fig. V-24
Dessin de définition

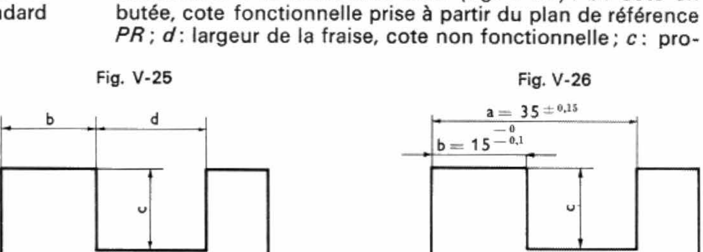


Fig. V-25
Dessin de fabrication

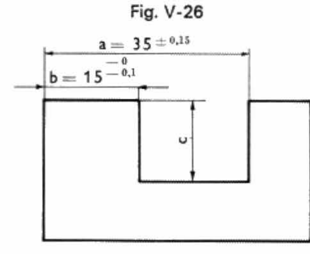


Fig. V-26
Méthode de transfert

À partir des dessins de produits finis, les préparateurs du travail ont donc à établir des dessins de fabrication destinés aux ateliers. Ces nouveaux dessins et leur cotation dépendent nécessairement des procédés d'exécution et de contrôle utilisés. Ces procédés peuvent d'ailleurs être divers pour une même pièce et varier d'une entreprise à l'autre. En effet, de nombreux facteurs peuvent intervenir dans la fabrication. Ce sont principalement: le mode opératoire, les techniques de fabrication particulières à une entreprise, les machines disponibles à la date du lancement, la quantité ou série de pièces identiques à réaliser (ce facteur est particulièrement important, car si la série est très importante elle peut justifier la réalisation de montages d'usinage ou de vérificateurs spéciaux qui peuvent être amortis), les conditions particulières qui concernent l'élaboration spécifiées sur le dessin de produit fini.

Ces divers facteurs nécessitent l'emploi de moyens de mesure ou de vérification non prévus par le dessinateur du bureau d'études, que le préparateur a à déterminer en fonction des caractéristiques du travail des machines-outils. Les cotes dont l'exécutant a besoin sont donc celles qui correspondent à des déplacements contrôlés d'organes de machines-outils, table ou têtes de travail, et qui sont facilement vérifiables par des instruments à lecture directe ou à l'aide de gabarits. En conséquence, le préparateur est parfois obligé de remplacer certaines cotes fonctionnelles du dessin de définition par des cotes utilisables par la fabrication, en respectant les tolérances affectées aux cotes fonctionnelles. Cette opération est désignée sous le nom de **transfert de cotes.** Néanmoins, ainsi qu'on va le voir par un exemple, le transfert de cotes présente quelques inconvénients. Ainsi chaque fois que cela est possible, on cherche à utiliser le dessin de produit fini comme dessin de fabrication, ce qui suppose que les exécutants effectueront le travail aux machines, et le contrôle directement d'après les cotes fonctionnelles.

fondeur. Or, il n'est plus possible de conserver simultanément les cotes *b*, *d* et *a* par suite des incompatibilités dans les tolérances. La cote fonctionnelle *a* doit être remplacée par la cote de fabrication *d*. Mais la tolérance et les écarts affectés à la cote *a* doivent être conservés. Le problème du transfert consiste donc pour cet exemple, à déterminer la tolérance et les écarts de *d* à partir de ceux des cotes *a* et *b* seuls connus. La méthode de calcul consiste à installer une chaîne de cotes sur une seule pièce. Dans cette chaîne, la cote abandonnée *a* devient la condition à respecter, tandis que les cotes d'usinage *b* et *d* en constituent les maillons (fig. V-26).

On va d'abord vérifier la compatibilité des données. On doit avoir: $IT_a = IT_b + IT_d$ et par suite: $IT_a > IT_b$ $0{,}30 > 0{,}1$.

Relation caractéristique: $a = b + d$, relation qui fournit la cote nominale: $d = a - b$, soit: $d = 35 - 15 = 20$.

Calcul des écarts de d. Équations fondamentales :

1° $a_{max} = b_{max} + d_{max}$

d'où: $d_{max} = a_{max} - b_{max} = 35{,}15 - 15 = 20{,}15$

2° $a_{min} = b_{min} + d_{min}$

d'où: $d_{min} = a_{min} - b_{min} = 34{,}85 - 14{,}9 = 19{,}95$

donc: $d = 20^{+0,15}_{-0,05}$ et $IT_d = 0{,}20$

Vérification : $IT_a = 0{,}3$; $IT_b + IT_d = 0{,}1 + 0{,}2$

La relation $IT_a = IT_b + IT_d$ est vérifiée.

On constate que le remplacement de la cote fonctionnelle *a* par la cote de fabrication *d*, a pour effet de restreindre la tolérance d'exécution qui passe de 0,3 à 0,2. Cette remarque est valable dans tous les cas de transfert; c'est la raison pour laquelle il est souhaitable d'utiliser directement, lorsque cela est possible, les cotes fonctionnelles pour la fabrication.

CHAPITRE VI
REPRODUCTION DES DESSINS

Les dessins sont établis au crayon ou à l'encre de Chine noire sur du papier calque transparent, sur du polyester également transparent mais indéformable, et, dans certains cas, sur du papier simplement translucide ou plus rarement sur de la toile à calquer. Dans tous ces cas le stade définitif du dessin est un tracé sur fond transparent, appelé calque ou cliché, et utilisé pour obtenir des reproductions peu coûteuses, en nombre illimité. Ce procédé est également utilisé pour la dactylographie sur l'un des supports ci-dessus, un carbone jaune spécial, inactinique, est placé au dos du calque, de façon à donner pour chaque caractère une empreinte jaune qui arrête les rayons violets et ultra-violets. Le procédé le plus généralement employé pour la reproduction est la diazotypie.

1. TIRAGES PAR DIAZOTYPIE

On utilise à cet effet un papier spécial, dit « papier héliographique ou papier diazo » dont une des deux faces au moins est revêtue d'une émulsion sensible à la lumière. Cette émulsion est à base de matières colorantes diazoïques qui éliminent leur azote au moment de l'insolation, et donnent à la face sensible du papier une couleur jaune. Le cliché est appliqué sur la face sensible et l'ensemble

est exposé pendant le temps convenable dans un châssis solaire, ou est introduit dans une machine à marche continue. Pour les appareils de petit rendement, la source lumineuse consiste en un ou plusieurs tubes fluorescents actiniques, de composition spéciale, qui émettent principalement des rayons violets. Pour les appareils de grand rendement, cette source est un tube à haute pression de mercure, à cathode sèche, générateur de rayons violets et ultraviolets (généralement en quartz, ces derniers tubes laissent passer les ultraviolets). La vitesse de déroulement des machines qui permet d'exposer plus ou moins le papier est réglable.

L'impression du papier à la lumière se fait par entraînement de l'ensemble : cliché-papier sensible, au moyen de sangles sans fin, autoréglables, qui tournent autour de rouleaux régulateurs de tension et entraînent le cliché et la matière sensible autour d'un cylindre de Pyrex ou de verre trempé. La source lumineuse est placée à l'intérieur du cylindre ; elle se trouve le plus près possible de la partie réservée à l'insolation (la quantité de lumière reçue en cet endroit est inversement proportionnelle au carré de la distance qui la sépare de la source lumineuse). Le papier est attaqué par la lumière à l'intérieur du circuit et sort impressionné ; le fond est blanc, les parties protégées par les traits du dessin seules restent jaunes. Le développement suit l'insolation. Il peut être réalisé à sec (procédé à l'ammoniaque) ou à l'aide d'un révélateur (procédé semi-humide). Dans les machines modernes le développement est intégré au même ensemble que l'insolation. Certaines, dites *à séparation automatique*, absorbent le papier sensible en sortie d'insolation, le mènent au développement et rejettent dans un bac extérieur les originaux qui ont servi à l'insolation. L'opérateur doit seulement alimenter la machine en originaux et en papier.

1.1. Procédé à l'ammoniaque. — L'émulsion du papier diazo contient non seulement le diazoïque, mais aussi le phénol qui copule avec celui-ci en milieu alcalin et donne le colorant stable du dessin. Le procédé le plus simple consiste à disposer les plans verticalement pendant dix minutes, à l'intérieur d'une boîte en bois, verticale aussi, munie à sa base d'une cuve à vapeurs ammoniacales et pourvue ou non de résistances pour faciliter l'évaporation. Dans certaines machines à développer, le papier diazo, entraîné par un tapis sans fin en caoutchouc, applique sa face sensible contre la tôle perforée en acier inoxydable (sommier) d'une chambre à gaz pourvue d'un bouilleur où l'ammoniaque pénètre goutte à goutte et s'évapore. Un seul dispositif sert à l'insolation et à l'entraînement du tapis de développement dans les machines combinées ; les vitesses sont synchronisées. D'autres machines n'ont pas de tapis ; le papier passe directement dans la chambre à gaz dont l'étanchéité est assurée par des rouleaux en ébonite, munis de segments racleurs qui empêchent les gaz de se propager. Les gaz passent dans un carburateur ou dans la chambre elle-même pour le développement des papiers et, à travers un conduit de sortie, sont expulsés hors de la pièce par une puissante turbine. À sa sortie de la machine, le papier a son aspect définitif : il porte des traits noirs, bleus, violets, rouges ou marrons, quelquefois même jaunes ou brun-orangés lorsqu'il s'agit de supports transparents destinés à de nouvelles reproductions (contre-calques ou contre-clichés). Le colorant obtenu est stable et doit résister aussi bien à la lumière qu'à l'eau. Ce procédé à l'ammoniaque permet seul la reproduction rigoureuse sans allongement, ni déformation sensible de l'échelle du document, puisque l'opération, très courte, se fait entièrement à sec.

La figure VI-1 représente un appareil du type combiné à ammoniaque qui permet l'insolation et le développement successifs. Il convient pour un bureau d'études de 5 à 10 dessinateurs. Sa largeur utile est de 1,20 m ; vitesse d'entraînement du papier 160 m/h ; source lumineuse : 3 tubes superacténiques de 120 W ; consommation : 2 200 W ; masse : 95 kg.

La figure VI-2 représente également une machine

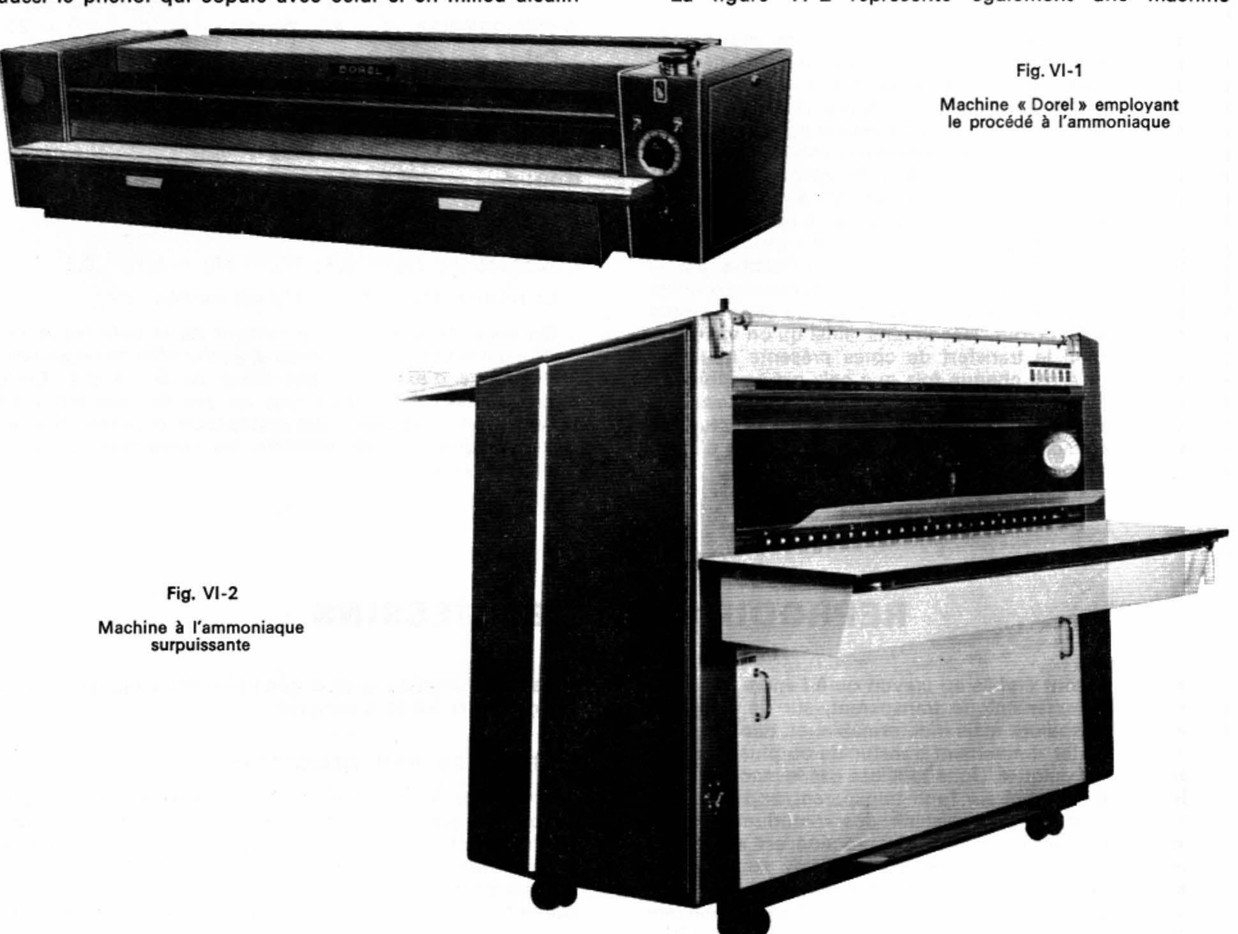


Fig. VI-1

Machine « Dorel » employant le procédé à l'ammoniaque

Fig. VI-2

Machine à l'ammoniaque surpuissante

combinée à ammoniaque surpuissante. Elle permet la séparation automatique des originaux. Elle est pourvue d'un « programmateur » qui effectue successivement toutes les opérations de mise en route. Elle suffit à un bureau de 50 dessinateurs. Elle permet la réception des tirages à plat à la partie supérieure de la machine. Munie d'un compteur-horloge, elle se met en route automatiquement à l'heure fixée la veille. Largeur utile : 1,30 m ; vitesse maximale : 1 000 m/h.

1.2. Développement semi-humide. — L'émulsion du papier ne comporte que le diazoïque ; le complément de la formule, soit le phénol (copulant), le corps alcalin (faible quantité de carbonate de soude) et différents produits annexes destinés à fixer le colorant, se trouvent dans le révélateur. Le papier passe au contact d'un ou de deux cylindres entraînés par un moteur électrique (synchronisé avec l'ensemble s'il s'agit d'une machine combinée). Ce ou ces cylindres barbotent dans des bacs à alimentation à niveau constant qui contiennent le révélateur sans ammoniaque ; une mince pellicule de révélateur est déposée sur la surface du papier et elle est aussitôt révélée. Le papier, sauf dans des cas très rares (certains appareils de bureau généralement mixtes et également utilisés pour la photocopie), n'est donc pas immergé dans le révélateur (s'il l'était, il recevrait une quantité trop importante de solution et il faudrait l'essorer). Plus le cylindre tourne vite, plus le papier est mouillé ; l'épaisseur de la pellicule de révélateur est en effet fonction de la vitesse de rotation du cylindre par l'action de la force centrifuge. Dans certaines machines, le papier est ensuite convoyé par un chemin métallique mobile au-dessus de résistances électriques ou de tubes infrarouges qui facilitent son séchage. Les tirages obtenus au sortir de la machine sont rarement secs ; ils sont moites mais peuvent être cependant coupés aussitôt après et éventuellement mis sous enveloppe. Ce procédé semi-humide n'utilise pas d'ammoniaque et ne nécessite aucune ventilation, mais les appareils doivent être constamment lavés et rincés (d'où un surcroît de main-d'œuvre). Les tirages obtenus ont subi un allongement important par rapport à l'original ; allongement qui est beaucoup plus marqué dans le sens de fabrication du papier que dans l'autre ; autrement dit, l'allongement est irrégulier. De plus, il se produit un retrait après séchage.

La figure VI-3 représente un modèle combiné à développement semi-humide. Cette machine permet des développements recto-verso. Elle utilise du papier sensible en rouleau ou en formats précoupés et donne des tirages secs. Elle convient à un bureau d'études de moyenne importance. Comme les modèles précédents, cette machine est entraînée par un moteur à couple constant, alimenté par cellules redresseuses et commandé par un variateur électromagnétique permettant un extrême ralenti. Ce modèle permet des vitesses comprises entre 5 et 200 m/h. Sa consommation est de 3 400 W et sa masse est de 125 kg.

2. TIRAGE À LA GÉLATINE

Ce procédé consiste en l'application d'un tirage au ferro-prussiate spécial sur une gélatine ferreuse préparée par coulage sur une plaque de zinc. Les parties impressionnées du tirage n'altèrent pas la gélatine, mais les parties qui correspondent aux traits l'attaquent en creux. Les tirages enlevés, on passe un rouleau garni d'une encre grasse qui enduit progressivement ces creux. Une feuille de papier mise en contact avec cette préparation est parfaitement imprimée. Ce procédé permet de tirer de 1 à 25 ou 30 exemplaires, suivant le cliché, la valeur du « ferro », l'état hygrométrique, etc. Il permet également le tirage soit monochrome de n'importe quelle couleur, soit polychrome, par reports successifs. Il est aussi utilisable pour le tirage sur papiers de toutes teintes et de toutes qualités, notamment sur le papier calque, ou sur la toile à calquer, pour

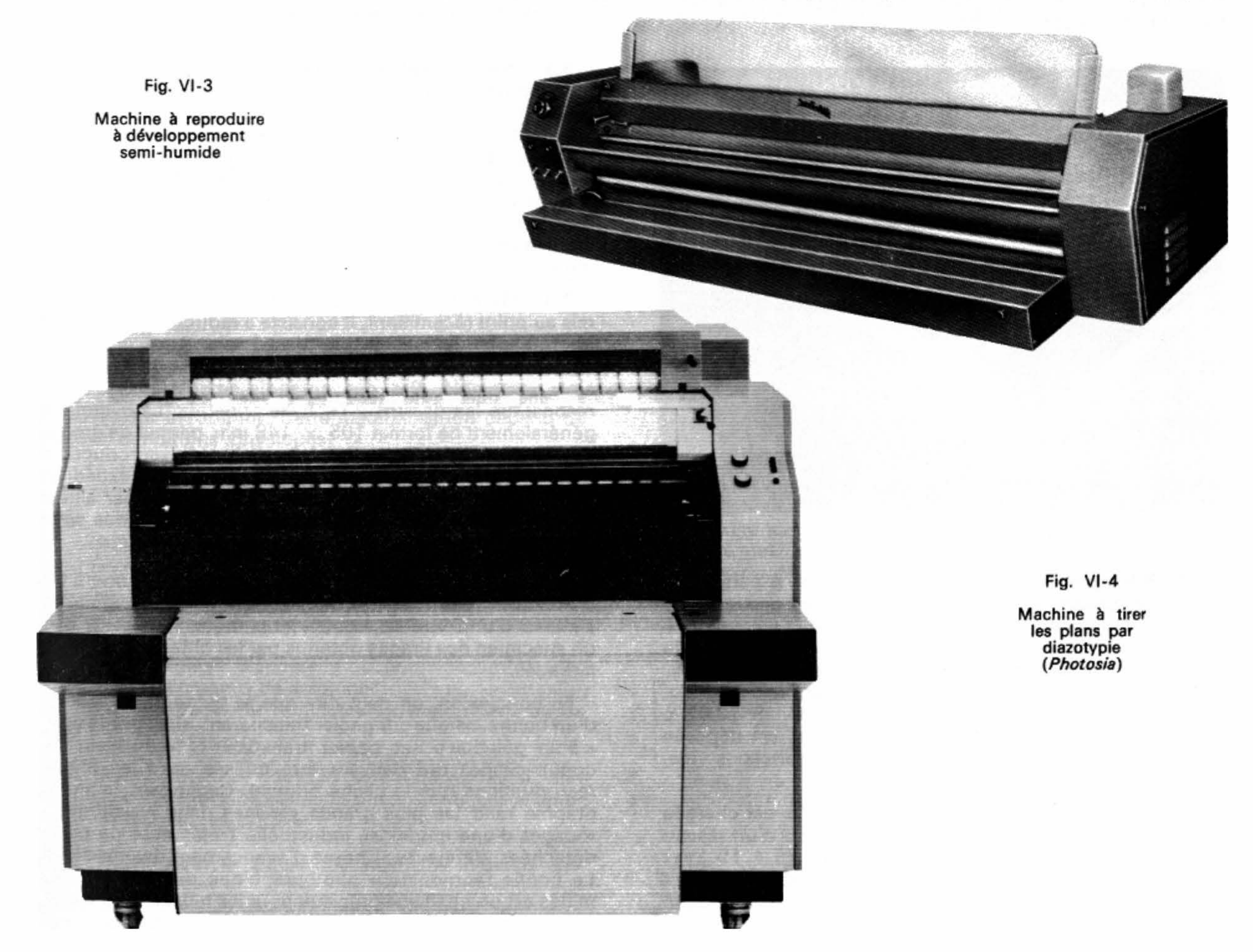


Fig. VI-3

Machine à reproduire à développement semi-humide

Fig. VI-4

Machine à tirer les plans par diazotypie (*Photosia*)

obtenir des contre-clichés utilisables pour la reproduction, au même titre que le cliché du dessin.

Par ce procédé on peut masquer des parties à supprimer sur le tirage ; on peut aussi en ajouter, mais il ne donne pas toujours des reproductions rigoureusement exactes, car les dimensions du papier peuvent varier pendant son application sur la gélatine humide. Après usage, les plaques de gélatine sont grattées, refondues et coulées pour de nouveaux tirages.

3. AUTRES PROCÉDÉS DE REPRODUCTION DES DESSINS

Le procédé *photolithographique* ou *zincographique* permet une reproduction économique et assez rapide d'un nombre illimité de tirages de très bonne qualité. D'autres procédés, moins employés que les précédents, sont utilisés par des spécialistes : procédé aux « sels d'argent », au « cyano-fer », « à la pâte » qui permet le tirage aux encres grasses, en de nombreuses couleurs, sans reports successifs.

Bien que surtout employés pour la reproduction de documents commerciaux, deux procédés de reproduction doivent être signalés car ils sont quelquefois utilisés pour des dessins de petit format.

3.1. Thermocopie. — Une lampe à infrarouges produit de la chaleur. Les blancs et les charges du document original ont des coefficients d'absorption de la chaleur différents. Le papier spécial qui passe dans la machine est impressionné et, en quelques secondes, il est possible d'obtenir une copie de n'importe quel document, opaque ou transparent.

Ce photocopieur permet en outre de réaliser un transparent de toute espèce de document qui peut être immédiatement projeté en salle claire, au moyen d'un « rétroprojecteur » ou d'un « épidiascope » (fig. VI-5).



Fig. VI-5 — Photocopieur *(3 M)*

3.2. Xérographie. — Le cliché est réalisé à partir d'un document opaque ou transparent. Les tirages peuvent être agrandis directement à partir de l'original, notamment à partir de microfilms. C'est un procédé de reproduction de documents mettant en œuvre les propriétés photorésistantes de certains semiconducteurs. Une surface sensible, constituée par une mince couche de sélénium (0,02 à 0,05 mm) additionné de tellure de sélénium, est déposée sur une feuille d'aluminium, par vaporisation sous vide, par exemple.

— Dans un premier temps, cette couche est chargée positivement en passant à très faible distance d'un réseau de conducteurs porté à un potentiel élevé (5 à 10 kV) ; le champ électrique engendré par ce dispositif produit l'ionisation des molécules d'air (effet Corona) et la plaque sensible est bombardée par des ions positifs. La charge électrique ainsi acquise peut être conservée plusieurs heures.

— Dans un deuxième temps, pour impressionner cette plaque (plaque xérographique), à l'aide d'un système optique approprié, on projette sur elle l'image du document à reproduire. Les parties éclairées se déchargent car le sélénium, devenant localement conducteur, permet le transfert de charges positives vers la plaque d'aluminium. Chaque élément de surface se décharge proportionnellement au flux lumineux qu'il reçoit. Les parties non éclairées (parties sombres de l'original) conservent leur charge positive.

— Dans un troisième temps, cette image est révélée au moyen d'une poudre formée de grains de résine extrêmement fins (0,1 à 10 μm) et de grains de chlorure d'ammonium ou d'acide tartrique ; ces éléments se chargent négativement par simple frottement. Ces grains porteurs de charges négatives sont répandus uniformément sur la plaque ; seuls ceux qui recouvrent la partie ayant conservé des charges positives adhèrent à la plaque.

— Dans un quatrième temps, cette image, qui reproduit l'original, est transférée sur une feuille de papier qui a préalablement reçu une charge positive. Par chauffage, pendant quelques secondes, on provoque ensuite une fusion de la poudre et on obtient une copie inaltérable, prête à l'emploi. Toutes ces opérations ne demandent qu'une dizaine de secondes et sont toutes réalisées automatiquement.

Un cliché tiré sur papier transparent, à partir de la plaque métallique, permet d'effectuer tous les tirages sur papier ordinaire par les procédés connus.

Ce procédé de reproduction électrique à sec est rapide et pratique ; mais son emploi comme celui de la thermocopie, est limité à la reproduction de documents de faibles dimensions ; aussi est-il surtout employé aux tirages de documents commerciaux.

3.3. Photographie directe. — Le document, posé à plat, est reproduit par photographie sur un papier bromure qui est ensuite développé normalement. Ce procédé convient à la reproduction des dessins de petites dimensions et de tous les documents, en grandeur originale ou réduite. Les perfectionnements apportés ces dernières années à l'optique et au matériel photographique permettent certaines applications scientifiques intéressant de nombreuses industries.

3.4. Microcopie. — Le procédé par microcopie a été mis au point récemment. Il consiste à réduire les documents photographiques sur un film de 16 mm. Sous un volume extrêmement faible un nombre considérable de dessins est ainsi rassemblé. Par des agrandissements ultérieurs on reconstitue les dessins à l'échelle primitive. La microfiche, généralement de format 105 × 148 mm, permet de grouper sur une seule feuille un grand nombre de reproductions, dont le classement est plus facile, ainsi que l'expédition par la poste. Les cartes à fenêtres comportent par ailleurs un film qui permet de leur appliquer le système des cartes perforées.

Exemples de reproductions de dessins : On donne à titre d'exemple (planches hors-texte) un calque original ou « cliché d'une vue en coupe d'un moteur Diesel », avec un spécimen des tirages obtenus par les différents procédés indiqués.

En conclusion, on peut dire que le tirage par diazotypie d'un contre-calque sur papier transparent, ainsi que le tirage « à la gélatine » sur papier transparent, fournissent des contre-clichés qui peuvent être utilisés pour les mêmes reproductions que le cliché original. Cependant, la photographie rend les plus grands services dans les différents rouages d'une entreprise industrielle (références de pièces détachées, différentes phases d'avancement des modèles). La bonne reproduction photographique des modèles terminés est un auxiliaire précieux pour les représentants et un moyen de publicité indispensable à notre époque.

MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE DE PIÈCES

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LA MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE

1. RAPPEL DE DÉFINITIONS

1.1. Mesure. — Depuis le temps le plus reculé de la civilisation, l'homme a éprouvé la nécessité de **mesurer,** c'est-à-dire d'évaluer une quantité en la comparant à une grandeur de même nature, choisie arbitrairement et appelée *unité*.

1.2. Unité. — V. t. 1. Préliminaires.

1.3. Étalon. — C'est la représentation matérielle de l'unité (valeur théorique). Cette matérialisation dépend de certaines conditions physiques :

1° Matériau utilisé pour sa fabrication (propriétés chimiques, physiques, mécaniques ; stabilisation moléculaire).

2° Milieu physique ambiant.

3° Température (20 °C en métrologie industrielle).

Les étalons sont utilisés pour des mesures par comparaison d'étalons (primaire, secondaire, d'atelier). Les étalons secondaires servent :

— pour le réglage d'appareils ou pour le contrôle des déplacements d'organes de machines ;

— pour le contrôle de vérificateurs d'instruments ou de pièces précises.

1.4. Contrôle. — Le contrôle permet de vérifier si l'élément considéré répond aux qualités dimensionnelles géométriques ou techniques exigées.

1.5. Tolérance. — Quels que soient les moyens employés pour réaliser et vérifier une pièce mécanique aux formes et aux cotes théoriquement définies, la valeur exacte ne peut être obtenue. Les machines les plus perfectionnées, les appareils les plus précis, ne peuvent permettre que de limiter l'approximation et cela d'autant mieux que croît la qualité des moyens d'exécution et de vérification.

On est donc amené à tolérer des écarts entre les cotes nominales, c'est-à-dire les cotes théoriques mathématiquement fixées et les cotes réelles ou mesurées. Cette nécessité s'applique également aux formes réelles et mesurées par rapport aux formes géométriques.

Remarque : Dans ce qui suit les cotes sont exprimées en millimètres et les tolérances en millièmes de millimètres (micromètres). Les symboles correspondant à ces unités ne sont pas reportés à la suite des cotes.

Exemple : On considère l'éprouvette normalisée de traction, à section circulaire, représentée sur la figure I-1. La norme indique :

— *tolérance dimensionnelle* diamètre $d = 10 \pm 75$ soit : diamètre maximal 10,075 mm ; diamètre minimal 9,925 mm ;

— *tolérance de forme :* erreur de cylindricité du corps 0,03.

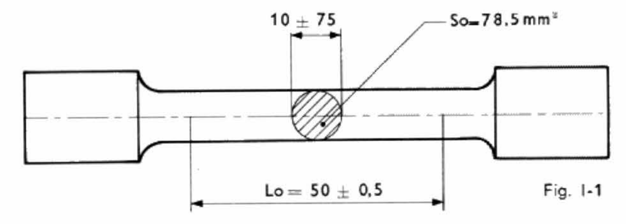


Fig. I-1

Ainsi, lorsque le diamètre à une extrémité du corps est de 10,020 mm (cote à l'intérieur de la tolérance) à l'autre extrémité, il ne peut être supérieur à 10,050 mm ni inférieur à 9,990 mm. La tolérance de fabrication du corps est donc

égale à 10,075 — 9,925 soit 0,15 mm. La tolérance de forme (0,03 dans l'exemple ci-dessus) est toujours située à l'intérieur de la tolérance dimensionnelle.

1.6. Ajustement. — Un assemblage ou ajustement est la réunion de deux éléments ayant même cote nominale (fig. I-2). En constructions mécaniques chaque ajustement est étudié pour satisfaire à des conditions techniques; il s'ensuit que l'ajustement peut comporter, soit un jeu, si la cote réelle du contenu est plus petite que celle du contenant, soit un serrage dans le cas contraire. Dans le premier cas, l'assemblage est mobile tandis que dans le deuxième cas il est fixe. Pour satisfaire l'une ou l'autre condition, chacun des éléments est réalisé à une cote calculée pour déterminer sur l'assemblage la valeur du jeu ou du serrage. Il ne faut pas confondre les jeux ou serrages pour assurer un fonctionnement correct des mécanismes avec les tolérances de fabrication qui ne peuvent être évitées, en raison de l'imperfection des moyens de fabrication et de vérification (V. § I.5). En construction mécanique, il existe trois méthodes pour réaliser un ajustement: unitaire, par interchangeabilité, par appariement ou appairage.

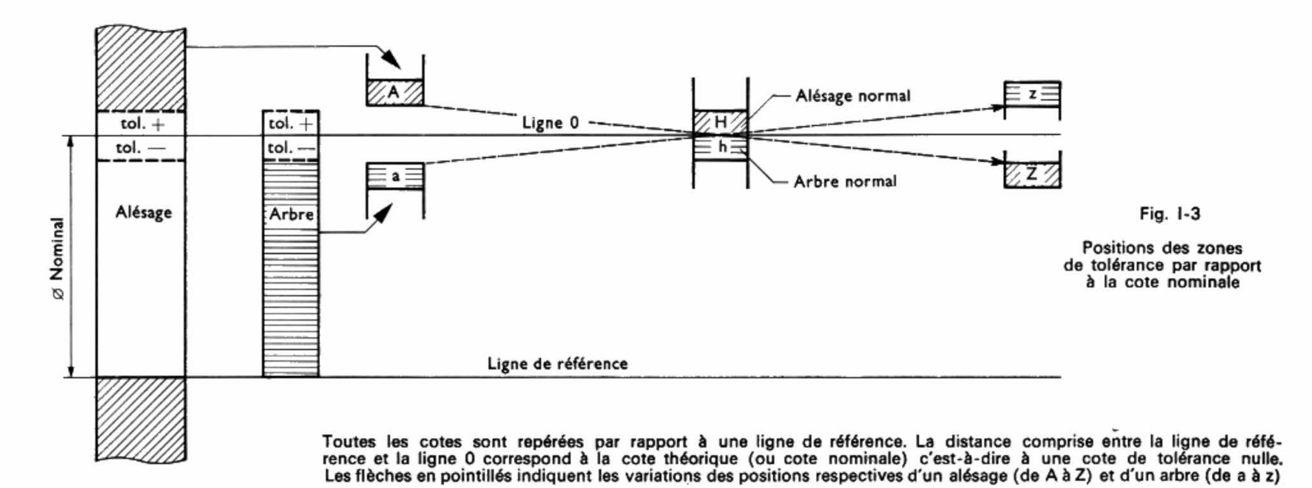


Fig. I-3

Positions des zones de tolérance par rapport à la cote nominale

Toutes les cotes sont repérées par rapport à une ligne de référence. La distance comprise entre la ligne de référence et la ligne 0 correspond à la cote théorique (ou cote nominale) c'est-à-dire à une cote de tolérance nulle. Les flèches en pointillés indiquent les variations des positions respectives d'un alésage (de A à Z) et d'un arbre (de a à z)

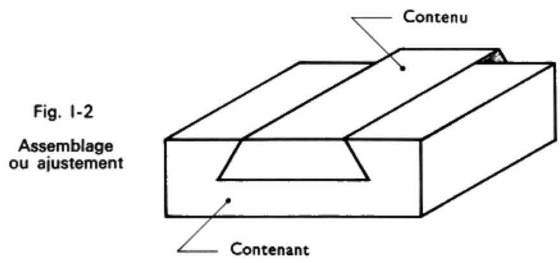


Fig. I-2

Assemblage ou ajustement

1.6.1. Méthode unitaire. — On réalise d'abord l'un des deux éléments (généralement l'alésage) à une cote réelle comprise dans la zone de tolérance et on ajuste sur lui l'autre élément, de manière à obtenir les conditions d'ajustement prévues. L'exécution ainsi que la vérification sont longues et délicates et nécessitent une main-d'œuvre qualifiée. Les pièces de même type ne sont pas forcément interchangeables.

1.6.2. Méthode en série par interchangeabilité. — En vue d'assurer la production en série d'éléments interchangeables, on a été conduit à normaliser les jeux et les serrages. L'organisation internationale ISO a créé un système international à limites. L'assemblage arbre-alésage étant retenu comme assemblage-type, la norme caractérise chacun des deux éléments assemblés par la qualité de son exécution, c'est-à-dire par la valeur de la tolérance et par la position assignée à cette tolérance par rapport à la cote nominale. De la combinaison de ces deux données résulte la gamme des ajustements normalisés (V. t. 3, Dessin technique, chap. 4).

On résume ci-après le principe du système international ISO

— Pour une même cote nominale:

1° il existe toute une gamme de qualités, c'est-à-dire de valeurs de tolérances repérées par un nombre compris entre 1 et 16.

Exemple: Une qualité 6 représente un usinage très soigné tandis qu'une qualité 12 représente une qualité obtenue en laminage;

2° par rapport à la cote nominale l'intervalle de tolérance choisi peut occuper des positions différentes. Cette position est repérée par une lettre de A à Z, majuscules pour les alésages, minuscules pour les arbres (fig. I-3).

— Pour les cotes nominales différentes, la valeur de la tolérance varie avec le même chiffre de qualité. Cette valeur augmente quand la cote nominale augmente.

Exemples:

Cote nominale 20 — qualité 6 = tolérance 13 μm

Cote nominale 60 — qualité 6 = tolérance 19 μm

Dans les fabrications mécaniques, on utilise couramment le système à alésage normal H. Le type d'assemblage est alors conditionné par la position de la zone de tolérance de l'arbre par rapport à la cote nominale.

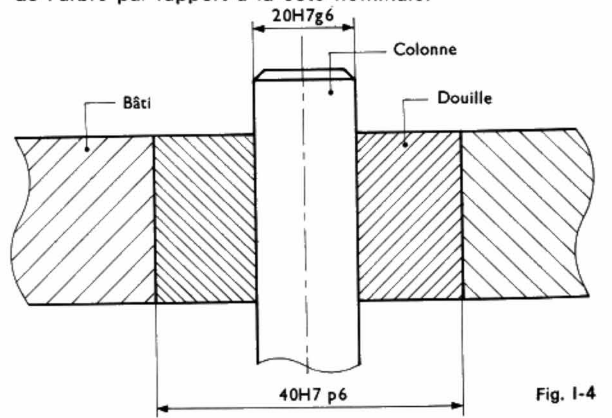


Fig. I-4

Application: Soit à réaliser le montage d'une colonne et d'une douille sur un bâti (fig. I-4).

L'ajustement 20 H7 g6 de la colonne et de la douille correspond à un assemblage mobile, soigné, l'ajustement 47 H7 p6 de la douille et du bâti correspond à un assemblage fixe à serrage normal à la presse. Le tableau des tolérances nous donne:

— pour 20 H7 g6: alésage 20 H7 = 20^{+21}_{0}, tolérance 21 μm, arbre 20 g6 = 20^{-7}_{-20}, tolérance 13 μm,

— pour 40 H7 p6: alésage 40 H7 = 40^{+25}_{0}, tolérance 25 μm, arbre 40 p6 = 40^{+42}_{+26}, tolérance 16 μm.

Calcul des jeux minimal, maximal et moyen pour chacun des deux ajustements précédents :

— pour 20 H7 g6 : alésage 20^{+21}_{0}, cote minimale 20, cote maximale 20,021 ; arbre 20^{-7}_{-20}, cote maximale 19,993, cote minimale 19,980 ; jeu minimal 7 µm ; jeu maximal 41 µm ; jeu moyen :

$$\left(\frac{7+41}{2}\right) = 24\ \mu m$$

— pour 40 H7 p6 : alésage 40^{+25}_{0}, cote minimale 40, cote maximale 40,025 ; arbre 40^{+42}_{+26}, cote maximale 40,042, cote minimale 40,026 ; jeu négatif ou serrage : maximal 42 µm, minimal 1 µm ; serrage moyen en alésage : (25 + 0 µm) pour l'arbre :

$$\left(\frac{42+1}{2}\right) = 21{,}5\ \mu m$$

Les normes NF E 02-131 à 135 de mai 1965 et NF E 02-100 de décembre 1970 définissent les tolérances des pièces lisses pour les dimensions nominales de 1 à 500.

1.6.3. Appariement ou appairage. — Dans certains cas d'ajustement (éléments de pompe à injection, de roulement à billes, cylindres de moteur à compression, etc.), le jeu fonctionnel moyen doit être très faible, voisin de 1 à 2 micromètres.

Cette condition exige une qualité d'usinage très soignée correspondant à des tolérances réduites pour chacun des éléments constituant l'assemblage ; cela entraîne l'utilisation de machines de haute précision, donc coûteuses, ainsi que de moyens de vérification appropriés.

Cette méthode onéreuse est incompatible avec la recherche d'un prix de revient le plus faible possible. Pour remédier à cet inconvénient, on a choisi d'apparier des pièces usinées en série : on fixe des tolérances de fabrication plus larges à chacun des éléments, ce qui permet d'usiner les pièces facilement sur des machines standards et l'on adapte des dispositifs d'autocontrôle ou de contrôle automatique à la machine pour classer les pièces par diamètre et les assembler par couple. On obtient ainsi des ajustements possédant le même jeu, même si les cotes réelles des éléments constituant l'ajustement sont différentes.

Application : Soit à réaliser un ajustement arbre-alésage de diamètre nominal 24 avec un jeu fonctionnel de 2 µm.

On choisit, par exemple, une tolérance de fabrication sur l'arbre et sur l'alésage de 5 µm, tolérance obtenue facilement sur une rectifieuse ou sur une machine à roder.

	Cotes réelles possibles					
Alésage 24^{+5}_{0}	24 ↓	24,001 ↓	24,002 ↓	24,003 ↓	24,004 ↓	24,005 ↓
Arbre 24^{+3}_{-2}	23,998	24,999	24	24,001	24,002	24,003
Jeu constant après classement	2 µm	2 µm	2 µm	2 µm	2 µm	2 µm

Le contrôle peut être fait au moyen d'un appareil pneumatique, d'un appareil électronique ou d'une machine à classer.

2. RÔLE DE LA MÉTROLOGIE EN FABRICATIONS MÉCANIQUES

2.1. Observations. — Toute pièce mécanique est constituée de solides géométriques limités par des surfaces planes ou courbes (hélicoïdales par exemple).

1° Ces solides peuvent avoir une forme géométrique précise et ils sont alors limités par des surfaces usinées (rabotées, fraisées, tournées, rectifiées, rodées) ; ce peut-être aussi des solides de liaison entre deux éléments géométriques et ils sont généralement limités par des surfaces brutes de forgeage, de fonderie, d'extrusion, etc.

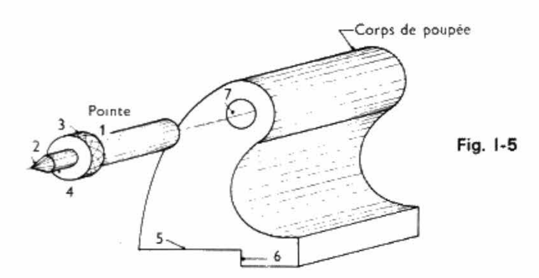


Fig. I-5

2° Deux éléments géométriques peuvent avoir une position précise l'un par rapport à l'autre.

Exemple : On considère une poupée mobile d'appareil à réglage sinus (fig. I-5). Cet ensemble est constitué de deux éléments : une **pointe** qui est l'un des éléments d'alignement de la pièce à vérifier et un **corps de poupée** qui est le support réglable de la pointe. Quelle que soit la position de l'une ou l'autre des poupées sur le banc, l'impératif d'alignement des pointes doit être respecté.

2.1.1. Pointe

1 est un élément d'alignement, il s'ajuste dans 7 ;
2 est un élément de centrage ;
1 et 2 ont des positions géométriques déterminées ;
3 et 4 ne sont que des éléments de liaison, leur forme, leurs dimensions, leur position n'ont pas de caractère précis.

2.1.2. Support

5 assure l'assise ;
6 permet l'orientation ;
7 assure l'alignement et l'ajustement de 1 ; il doit être positionné géométriquement par rapport à 5 et 6.

2.1.3. Conclusion. — Pour ces raisons, la métrologie formelle et dimensionnelle intéresse toute la vérification des formes et des dimensions ; elle occupe une place prépondérante dans les fabrications mécaniques modernes. Elle est le trait d'union entre le bureau d'études qui conçoit la pièce suivant des impératifs précis et les ateliers de fabrication chargés de sa réalisation. Elle conditionne la *qualité* et le *prix de revient* des pièces, bases essentielles de l'évolution des techniques.

Dans le domaine industriel, la métrologie dimensionnelle a pour rôle :

— La mesure et le contrôle des étalons.
— La vérification ou le réglage des instruments et des appareils.
— Le contrôle des pièces à tous les stades de fabrication (de l'ébauche au montage).
— La vérification géométrique des machines-outils et la recherche des performances possibles.

3. CONDITIONS DE MESURE

Pour satisfaire les conditions de qualité nécessaires, trois critères concernant le vérificateur sont à considérer : son *choix*, ses *qualités de mesure*, son *étalonnage*.

3.1. Choix du vérificateur. — On appelle vérificateur, tout support, instrument, dispositif, appareil, permettant la mise en position d'une pièce, le relevé d'une dimension ou d'une forme, etc. Les vérificateurs utilisés en métrologie sont nombreux et variés puisque ce terme s'applique aussi bien à un simple support (marbre) qu'à la machine la plus complexe (trieuse de pièces). Ils sont choisis en fonction de la *nature de l'élément* à vérifier (fonction, forme, étendue, etc.), de la *précision imposée* (valeur de la tolérance) et du *nombre de pièces fabriquées* (quelques unités ou importante série).

3.2. Qualités de mesure d'un vérificateur. — Un vérificateur doit présenter les trois qualités suivantes :

1° *Justesse.* — Elle est caractérisée par la plus faible différence qui existe entre la valeur réelle de la grandeur mesurée et la valeur indiquée par le vérificateur.

2° *Fidélité.* — Elle caractérise la concordance des valeurs indiquées par le vérificateur pour une même grandeur mesurée plusieurs fois dans des conditions de mesure identiques (même température, même opérateur).

3° *Sensibilité.* — Elle est caractérisée par la valeur du déplacement lue ou enregistrée par le vérificateur, correspondant à la plus faible variation de la grandeur mesurée.

3.3. Étalonnage du vérificateur. — Quel que soit le type du vérificateur utilisé, on doit avant toute vérification s'assurer qu'il représente bien une référence de comparaison. Cet étalonnage se fait à la valeur la plus voisine de la valeur à mesurer, au moyen d'un étalon. Dans les mesures très précises il y a lieu de respecter la température de comparaison qui a été fixée conventionnellement à 20 °C ainsi que l'équilibre de la température de la pièce et du vérificateur (V. t. 1, Thermodynamique).

Exemple : Pour mettre en évidence l'importance de la température on va déterminer la longueur d'une cale étalon en acier traité utilisée à la température de 30 °C. On suppose qu'elle mesure 50 mm à 20 °C. On appelle L_{30} et L_{20} les longueurs de la cale respectivement à 30 °C et à 20 °C, et λ le coefficient de dilatation linéaire de l'acier traité ($\lambda = 13.10^{-6}$ °C^{-1}) :

$$\frac{L_{30}}{L_{20}} = \frac{1 + 30\lambda}{1 + 20\lambda}$$

soit :

$$L_{30} \approx L_{20}(1 + 10\lambda)$$
$$L_{30} \approx 50(1 + 10 \times 13 \times 10^{-6})$$
$$L_{30} \approx 50{,}006\,5 \text{ mm}$$

Cette variation montre l'importance du respect de la température dans les vérifications précises.

3.4. Observation sur les possibilités d'erreurs de mesure

Exemple récapitulatif : La cote A de deux pièces P1 et P2, de même type, ayant même cote nominale, est mesurée par trois opérateurs A, B, C utilisant trois vérificateurs différents. On inscrit les résultats des mesures effectives sur le tableau ci-après :

Opérateur	Pièce \ Vérificateur	Pied à coulisse	Micromètre	Comparateur Solex
A	P1	20,1	20,61	20,123
	P2	20,1	20,61	20,124
B	P1	20,15	20,62	20,1235
	P2	20,1	20,62	20,1234
C	P1	20,2	20,61	20,123
	P2	20,25	20,62	20,1234

Conclusions

1° L'utilisation du pied à coulisse révèle une incertitude de mesure provenant de l'opérateur (erreur d'appréciation) et de l'instrument (pression de contact). La précision est voisine de 0,1 mm.

2° L'utilisation du micromètre révèle une différence sensible de mesure avec celles effectuées à l'aide des deux autres vérificateurs. Cette différence (0,5 mm) provient du non étalonnage de l'instrument avant l'emploi. La fidélité de mesure de cet instrument est bonne.

3° Le comparateur Solex permet des mesures précises, fidèles et sensibles.

Les conclusions ci-dessus, très succinctement exposées, montrent que l'erreur et l'incertitude de mesure ont plusieurs origines : le *vérificateur* (erreur de graduation, par exemple), l'*étalon* (erreur de définition), l'étalonnage (absence ou erreur), l'*opérateur* (erreur d'appréciation), la *pièce* (erreur de forme macrographique et micrographique). Ces erreurs peuvent s'additionner ou se soustraire (même éventuellement se compenser). La qualité d'une vérification consiste donc à utiliser toujours un procédé et un vérificateur de qualité supérieure à l'erreur de mesure admise. C'est ainsi que pour un contrôle de pièce au centième de millimètre, on choisit un procédé et un appareil donnant le millième de millimètre. L'appareil Solex convenablement utilisé permet d'apprécier le dixième de micromètre et c'est ce qui explique qu'on ait pu évaluer une différence de 1 micromètre entre les pièces P1 et P2 dans l'exemple précédent.

4. ANALYSE DES VÉRIFICATIONS EFFECTUÉES SUR UNE PIÈCE MÉCANIQUE

L'ordre et le nombre des opérations de vérification à effectuer sur une pièce s'établissent à partir de sa fonction, de sa phase d'usinage (de l'état brut à l'état fini), des tolérances géométriques et dimensionnelles.

Le nombre de pièces déterminent les opérations de contrôle et le type de vérificateurs à utiliser. La vérification complète d'une pièce est faite suivant l'ordre ci-après ; elle comporte les phases suivantes :

1° Vérification de la conformité avec le dessin et de l'aspect général (esthétique).

2° Vérification de la forme géométrique.

3° Vérification des dimensions.

4° Vérification de la rugosité de surface.

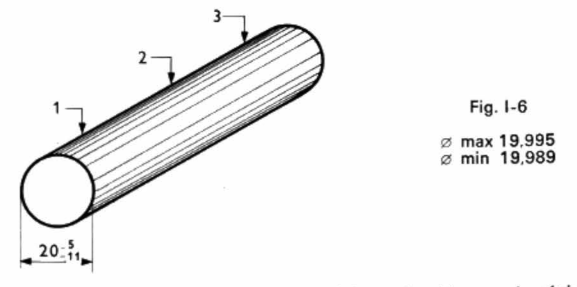
4.1. Aspect général et conformité. — Cette opération est généralement visuelle et rapide, elle permet d'éliminer ou d'écarter les pièces présentant des omissions, des défauts d'usinage, ou des défauts d'aspect (soufflure, criques, coup d'outil, irrégularités) susceptibles de subsister après les usinages ultérieurs.

4.2. Forme géométrique. — Le contrôle de forme qui revêt un caractère important dans cette suite d'opérations comprend la vérification des lignes et des surfaces (rectitude, planéité, circularité ou faux rond, etc.), la vérification de la position des lignes et des surfaces (parallélisme, cylindricité, coaxialité, concentricité, pente, conicité, voilage, etc.).

Remarque : La pièce étant décomposée en éléments géométriques, on considère toujours l'élément géométrique (solide, surface, ligne) le plus étendu ou dont la fonction est la plus importante comme référence.

4.3. Dimension. — Une dimension est une distance entre deux points, deux lignes ou deux surfaces. La vérification dimensionnelle a donc pour objet, la mesure des diamètres, des longueurs, des épaisseurs, etc. Quoique la vérification d'une forme géométrique se ramène à un contrôle dimensionnel en plusieurs points, et que dans la pratique les vérifications géométriques et dimensionnelles soient généralement simultanées, il y a lieu de les différencier.

Exemple : L'axe cylindrique (fig. I-6) s'ajuste dans un alésage. Pour des raisons d'utilisation on admet une tolérance géométrique de cylindricité de 3 µm et une tolérance dimensionnelle de 6 µm. Les vérifications aux points 1, 2, 3, révèlent les valeurs respectives : 19,988, 19,989, 19,990.



L'écart entre deux mesures est inférieur à 3 µm : la tolérance géométrique est respectée. Ces mesures ne sont pas comprises dans l'intervalle imposé (19,995 mm et 19,989 mm) : la tolérance dimensionnelle n'est pas respectée

Conclusion. — La tolérance géométrique de cylindricité est respectée, la tolérance dimensionnelle ne l'est pas. Si l'assemblage est unitaire, la pièce pourra être utilisée, à condition d'adapter l'alésage à cet arbre. La mesure d'un diamètre seul n'aurait pas permis d'adopter cette solution.

4.4. Rugosité de surface. — La rugosité d'une surface est l'ensemble des petites irrégularités microgéométriques. Les normes NF E05-015 et E05-016 englobent dans le terme *état de surface :*

1° *L'état géométrique* de la surface qui dépend de l'écart géométrique d'une surface usinée par rapport à celle géométriquement idéale. Cet écart comprend les écarts de forme et de rugosité.

2° *L'état mécanique* de la surface qui est lié à la nature de la couche superficielle de la pièce (structure, tension superficielle, etc.).

L'ensemble des procédés de mesure employés pour la vérification des formes ne permet pas de déceler la valeur des rugosités. Pour cette raison principale, la mesure de la rugosité est une vérification indépendante de la vérification de la forme géométrique (V. chap. 2, § 6).

4.5. Exemple récapitulatif. Fiche de contrôle. — On détermine l'ordre et le nombre d'opérations à effectuer sur la pièce en vue de sa réception, ainsi que le matériel proposé. Le tableau ci-contre, donné à titre d'exemple, concerne une pointe d'appareil sinus représentée par la figure I-5. La fabrication de la pièce nécessite quatre phases d'usinage: tournage (forme générale), fraisage (rainure de déplacement de la pièce), traitements thermiques (cémentation, trempe, revenu), rectification (soit à vérifier la phase d'ébauche de tournage).

Phase de contrôle Opérations	Matériel proposé
1-0 — *ASPECT GÉNÉRAL*	
Conformité 1 — Aspect des surfaces lisses 2 — Aspect de la surface moletée 3 — Chanfreins - rainure de dégagement 4 — Centre protégé	Visuel
2-0 — *CYLINDRE*	
1 — Circularité 2 — Cylindricité 3 — Diamètre	Pied à coulisse
3-0 — *CÔNE*	
1 — Circularité 2 — Conicité	Vé et comparateur ou appareil à vérifier entre pointe calibre à 60°
3 — Coaxialité du cône avec le cylindre	Appareil à vérifier entre pointes

Remarque : Le nombre, le genre d'opérations, le matériel proposé ci-dessus, concernent l'ébauche au tour d'une pièce ou de quelques pièces.

CHAPITRE II

VÉRIFICATEURS UTILISÉS EN MÉTROLOGIE

1. CLASSIFICATION

Les vérificateurs utilisés en métrologie pour la mesure et le contrôle peuvent se diviser en trois catégories principales.

1° Les *vérificateurs à traits à dimensions variables* pour la mesure des longueurs et la mesure des angles: réglet, pied à coulisse, micromètre, rapporteur, machine à mesurer.

2° Les *vérificateurs à dimensions fixes* pour la vérification des pièces réalisées entre deux limites imposées suivant le principe de l'interchangeabilité: calibres et tampons à limites.

3° Les *vérificateurs à mesure indirecte, par comparaison :* calibres de forme, comparateurs, amplificateurs.

Dans le cadre restreint de ce chapitre, on se limitera à une description sommaire des vérificateurs les plus couramment utilisés:

— pour la vérification unitaire (outillage, prototype),
— pour la vérification en série (arbre, alésage),
— pour les vérifications particulières (étalon, surface plane, filetage, engrenage, machine-outil, etc.).

2. VÉRIFICATEURS À TRAITS À DIMENSIONS VARIABLES

2.1. Vérificateurs pour les mesures linéaires. — Cette catégorie d'instruments comprend tous ceux qui permettent de lire, directement sur une échelle graduée, les dimensions extérieures ou intérieures de la pièce à vérifier. Ils sont encore fréquemment utilisés pour la mesure ou le contrôle des pièces unitaires ou de très petites séries. La précision de mesure de ces vérificateurs impose en particulier un étalonnage précis et une manipulation par des opérateurs qualifiés.

2.1.1. Réglet (pour mémoire). — C'est l'instrument de mesure le plus simple, il ne permet des mesures qu'avec une approximation de quelques dixièmes de millimètres.

2.1.2. Calibre à coulisse. — Appelé couramment pied à coulisse, il est encore très utilisé, par exemple, dans les ateliers d'outillage. (V. planche).

La graduation du curseur se nomme *vernier,* du nom de son inventeur, géomètre français du XVI[e] siècle. Le vernier est gradué en 10, 20 ou 50 parties égales, de telle sorte que lorsque les becs se touchent, la 10[e], la 20[e] ou la 50[e] division soit respectivement en coïncidence avec la 9[e], la 19[e]

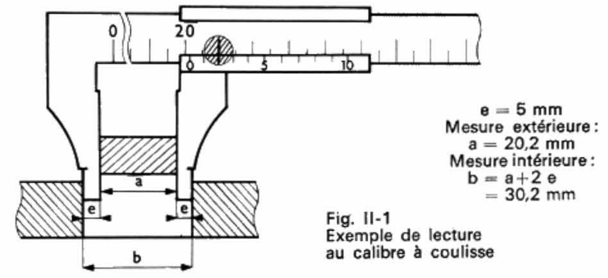


Fig. II-1
Exemple de lecture au calibre à coulisse

ou la 49[e] graduation de la règle. Chaque division vaut donc respectivement 9/10, 19/20 ou 49/50 de mm. La lecture d'une dimension au pied à coulisse (fig. II-1) se décompose ainsi :

1° Lecture *sur la règle* du nombre de millimètres compris entre le zéro et la division située immédiatement à gauche du zéro du vernier.

2° Lecture *sur le vernier* du nombre de dixièmes, de vingtièmes ou de cinquantièmes en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division

de la règle. La précision de mesure est comprise entre 0,1 et ± 0,02 de mm (selon le nombre de divisions du vernier).

2.1.3. Micromètres (V. planche). — Les différents types de micromètres utilisés en métrologie dimensionnelle

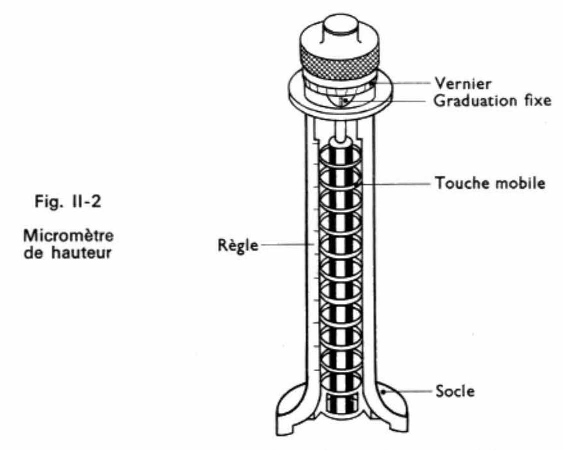


Fig. II-2
Micromètre de hauteur

permettent les vérifications des dimensions extérieures ou intérieures des pièces lisses (hauteur, épaisseur, longueur, profondeur, diamètre) ainsi que les dimensions extérieures ou intérieures des pièces filetées (diamètre nominal, diamètre moyen) avec une précision proche d'un centième de millimètre. Tous ces instruments découlent du *palmer*, du nom du mécanicien français qui en fit breveter l'invention en 1848.

Le palmer comporte une douille graduée en 100 parties égales, solidaire d'une vis au pas de 1 mm; la douille permet le contrôle en rotation des déplacements de cette vis dans son écrou. Chaque intervalle sur la douille représente une rotation de la vis de 0,01 mm. Le nombre de millimètres correspondant au nombre de tours complets de la vis dans son écrou est lu sur une graduation linéaire millimétrique. Les instruments utilisés en fabrication mécanique et en contrôle possèdent tous une vis au profil et au pas de 0,5 mm ; ils sont très précis (ce qui justifie leur appellation de micromètres).

À quelques exceptions près (amélioration du système de lecture) les micromètres courants possèdent une douille graduée en 50 parties égales et une échelle linéaire graduée en millimètres et demi-millimètres. Les micromètres pour mesures extérieures ont une capacité de mesure de 25 mm pour une gamme de mesure de 0 à 400 mm. Les micromètres pour mesures intérieures ont une capacité de mesure de 3 à 5 mm.

Lecture du micromètre. — Le micromètre étant étalonné à la valeur minimale de sa capacité ou, ce qui est mieux à la valeur la plus approchée de la valeur à mesurer, on lit :

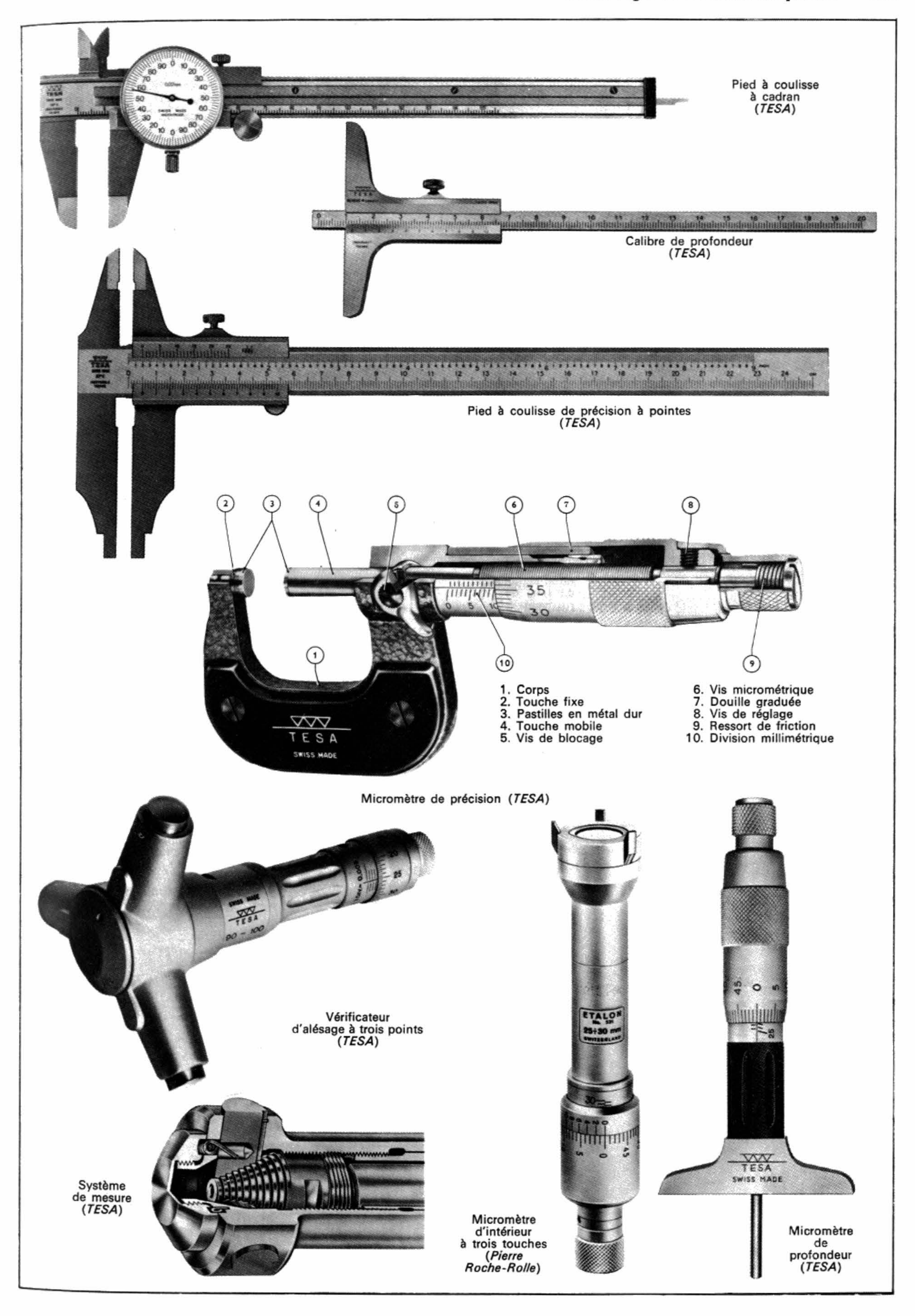
1° Le nombre de millimètres sur la graduation millimétrique, à la dernière division découverte par la douille.

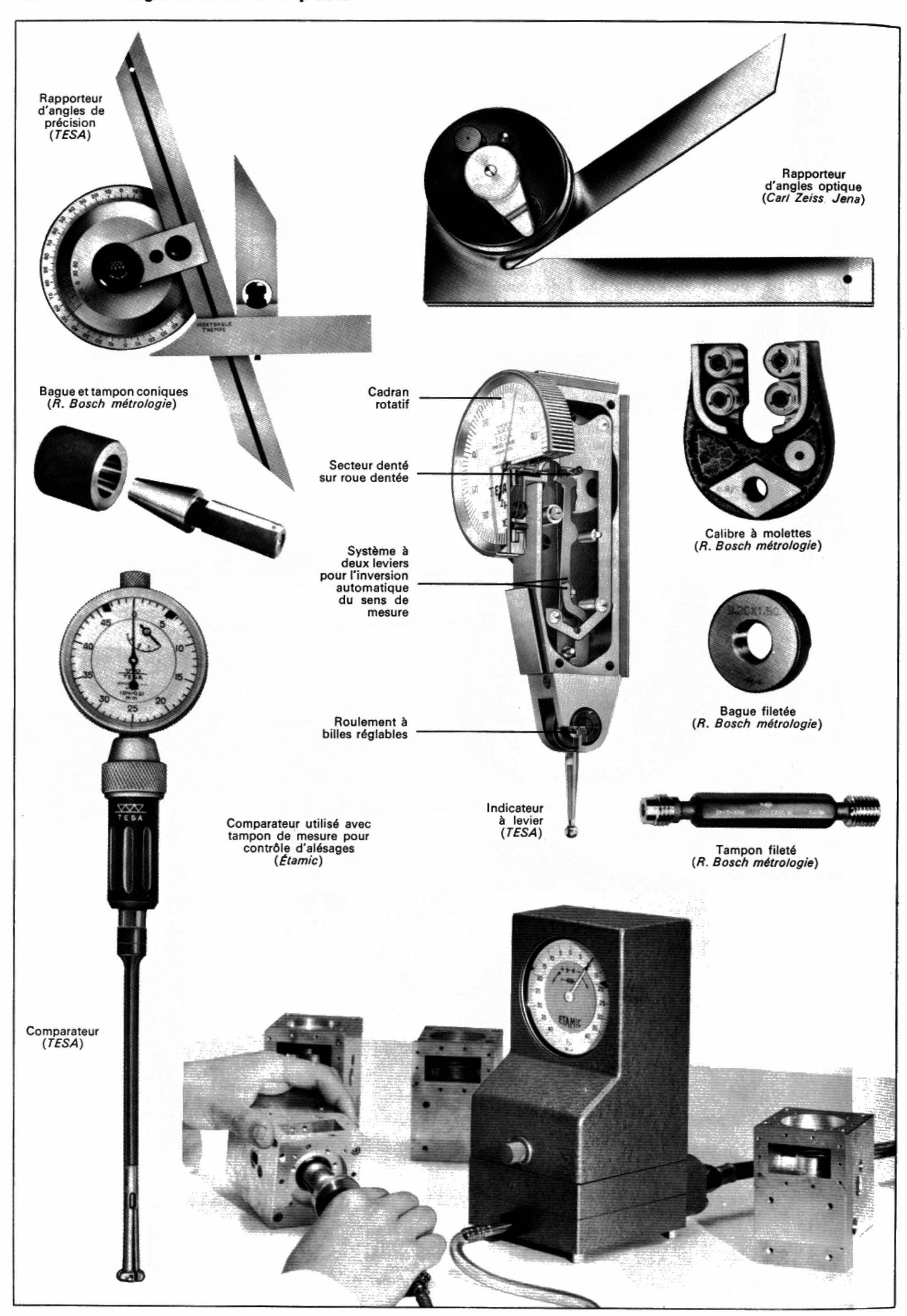
2° Le nombre de centièmes de millimètres sur la douille, à la division qui coïncide ou qui est la plus approchée de la génératrice repère.

2.1.4. Machines à mesurer. — Toute fabrication de précision requiert des moyens de mesure d'une exactitude rigoureuse. Les machines à mesurer sont destinées aux mesures de toute dimension, en particulier au contrôle périodique de l'ensemble des calibres, des cales ou des

Machine à mesurer universelle
(*Société genevoise d'instruments de physique*)

Machine à mesurer universelle à trois coordonnées
(*Société genevoise d'instruments de physique*)


Pied à coulisse
à cadran
(*TESA*)
Calibre de profondeur
(*TESA*)
Pied à coulisse de précision à pointes
(*TESA*)
1. Corps
2. Touche fixe
3. Pastilles en métal dur
4. Touche mobile
5. Vis de blocage
6. Vis micrométrique
7. Douille graduée
8. Vis de réglage
9. Ressort de friction
10. Division millimétrique
TESA
SWISS MADE
Micromètre de précision (*TESA*)
Vérificateur
d'alésage à trois points
(*TESA*)
Système
de mesure
(*TESA*)
Micromètre
d'intérieur
à trois touches
(*Pierre
Roche-Rolle*)
Micromètre
de
profondeur
(*TESA*)


Rapporteur d'angles de précision (*TESA*)
Rapporteur d'angles optique (*Carl Zeiss Jena*)
Bague et tampon coniques (*R. Bosch métrologie*)
Cadran rotatif
Secteur denté sur roue dentée
Système à deux leviers pour l'inversion automatique du sens de mesure
Roulement à billes réglables
Indicateur à levier (*TESA*)
Calibre à molettes (*R. Bosch métrologie*)
Bague filetée (*R. Bosch métrologie*)
Tampon fileté (*R. Bosch métrologie*)
Comparateur utilisé avec tampon de mesure pour contrôle d'alésages (*Étamic*)
Comparateur (*TESA*)
TESA
ETAMIC

références de l'usine (broche, tampon lisse et fileté, calibre mâchoire) et aux mesures pour lesquelles la méthode des calibres n'est plus assez précise. Elles sont bien adaptées dans le cas de prototypes ou de petites séries pour lesquels l'achat de calibres ne se justifie pas.

On distingue deux types de machines à mesurer : les *machines linéaires ou axiales* et les *machines à deux ou trois coordonnées* (pour chaque coordonnée, l'organe fondamental est généralement une règle étalon divisée). La graduation de la règle est lue au moyen d'un microscope.

La capacité de mesure de ces machines s'étend de 300 mm à 4 m. Sur une bonne machine à mesurer on peut obtenir une précision de lecture de ±0,5 micromètre par mètre, ce qui permet une précision de mesure de 1 micromètre par mètre.

2.2. Vérificateurs pour les mesures angulaires. — Ces vérificateurs permettent de lire directement la mesure d'un angle.

2.2.1. Le rapporteur simple. — Comparable au réglet pour les mesures linéaires il permet une précision de lecture d'environ 10 minutes. Nous le citons surtout pour mémoire.

2.2.2. Le rapporteur de précision. — Il possède un vernier basé sur le principe du vernier du calibre à coulisse (fig. II-3). Suivant le nombre de divisions de ce vernier, on peut obtenir une mesure angulaire avec une approximation comprise entre 1 minute et 5 minutes.

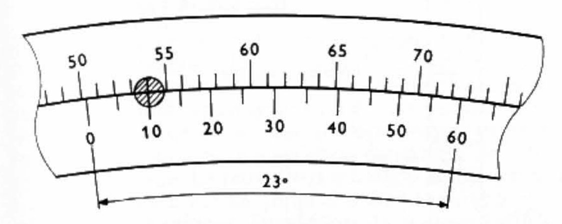


Fig. II-3 — Lecture au rapporteur avec vernier au 1/12. On lit 50° 10'

Principe du vernier angulaire. — On prend l'exemple du vernier au douzième de degré. L'ensemble de la graduation correspond à un arc de 23°. Il est divisé en 12 parties égales. Chaque division est donc égale à $\frac{23}{12}$ de degré. Entre deux divisions de la couronne graduée et une division du vernier il y a une différence égale à $\frac{24}{12} - \frac{23}{12} = \frac{1}{12}$ de degré soit 5 minutes.

La lecture d'un angle au rapporteur peut donc être faite de la même manière que celle d'une longueur avec un calibre à coulisse.

2.2.3. Diviseur optique. — Pour les mesures angulaires, le diviseur optique représente l'équivalent de la machine à mesurer. Il convient aux mesures très précises d'angles de roues dentées, de plateaux diviseurs, d'arbres à cames, de montage d'usinage, etc. Il peut également se monter sur une pointeuse, par exemple, il est alors utilisé comme montage d'usinage. Sa précision de lecture est de 2 secondes.

3. CALIBRES À LIMITES

Un calibre à limites matérialise une grandeur avec une très grande précision. Il permet de s'assurer qu'une dimension déterminée est comprise dans sa zone de tolérance sans qu'il soit possible de connaître la mesure de cette dimension. Les calibres à limites sont utilisés pour la vérification des pièces usinées en série (pièces lisses, cylindriques et coniques, pièces filetées) ainsi que pour le réglage et l'étalonnage des vérificateurs.

Un calibre à limites comprend deux parties mesurantes reliées l'une à l'autre ou séparées. La vérification au moyen d'un calibre à limites comprend toujours deux opérations : la *vérification avec la partie mesurante « entre »* et la *vérification avec la partie mesurante « n'entre pas »*. Si cette condition est satisfaite, la dimension réelle de la pièce à vérifier est comprise dans la zone de tolérance.

Les calibres à limites sont en acier trempé et stabilisé ; les parties mesurantes peuvent être chromées superficiellement ou être en carbure métallique. La finition est faite par rodage.

Ces appareils doivent être maniés avec beaucoup de précaution, en particulier on ne doit jamais forcer pour présenter un calibre sur la pièce à vérifier. Les calibres à limites sont fabriqués avec des tolérances qui sont établies en rapport avec les critères du système d'interchangeabilité ISO. Ils font l'objet de contrôles fréquents ; en particulier on vérifie si la limite d'usure prévue pour la partie « entre », n'est pas atteinte.

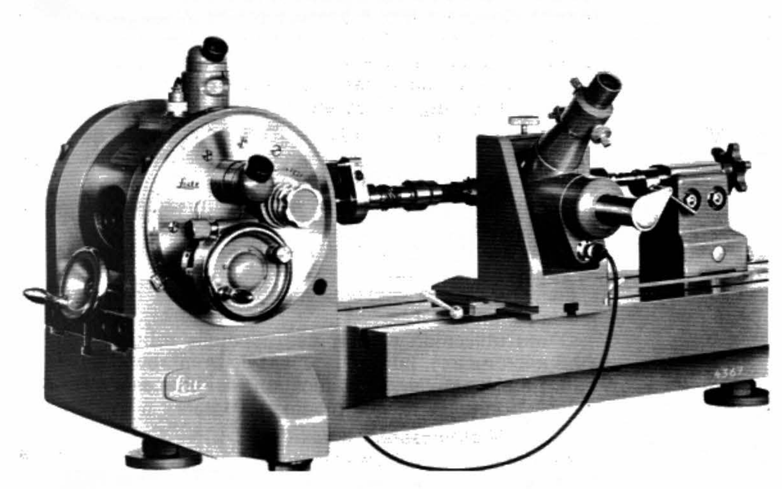
Application : Soit à contrôler l'alésage 24 H7 tolérance : 21 micromètres (minimum : 24, maximum 24,021). On utilisera un tampon à limites marqué 24 H7

tolérance de fabrication du tampon
- de la partie mesurante « entre » + 5 µm
  + 1 µm
  limite d'usure — 3 µm
- de la partie mesurante « n'entre pas » + 23 µm
  + 19 µm

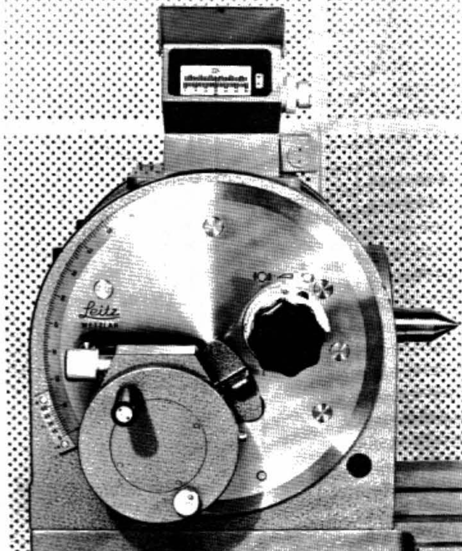
Fabrication du tampon

a) *Du côté « entre »*, correspondant au miminum de l'alésage : diamètre maximal 24,005, diamètre minimal 24,001.

b) *Du côté « n'entre pas »*, correspondant au maximum de l'alésage. Diamètre maximal 24,023, diamètre minimal 24,019.



Diviseur optique de précision à double lecture microscopique (*Leitz*)



Diviseur optique de précision à lecture par projection (*Leitz*)

Contrôle du tampon

a) *Côté «entre»* : diamètre limite d'utilisation 23,997.

b) *Côté «n'entre pas»* : entre les valeurs limites.

4. VÉRIFICATEURS À MESURE INDIRECTE PAR COMPARAISON

4.1. Principe de la mesure par comparaison. — La mesure par comparaison consiste à évaluer la différence de forme ou de dimension qui existe entre une grandeur connue, matérialisée par un étalon (cale pige, pièce type, épure) et la valeur réelle de l'élément à mesurer. En général, l'écart est amplifié et lu sur un dispositif de lecture ou d'enregistrement d'un appareil. Les comparateurs utilisés en métrologie sont donc en fait des amplificateurs dont la sensibilité peut s'étendre de 10 à 100 000, suivant le principe et l'amplification adoptés.

Remarque : Le micromètre, instrument à mesure directe est en réalité un comparateur. En effet, la lecture directe nécessite un étalonnage comme pour les vérificateurs à mesure indirecte. De plus, le vernier gravé sur la douille est un amplificateur puisqu'il permet d'apprécier aisément des écarts de position de la touche mobile très faibles (1/100).

4.2. Principaux comparateurs. — Ils sont classés en tenant compte du moyen d'amplification mis en œuvre. On distingue : les comparateurs à amplification mécanique, les comparateurs à amplification pneumatique, les comparateurs à amplification optique, les comparateurs à amplification électrique ou électronique.

4.2.1. Comparateurs à amplification mécanique. — Les comparateurs à amplification mécanique ont de nombreuses utilisations tant à l'atelier qu'au service contrôle. Montés sur différents supports, ils permettent d'effectuer les principales vérifications nécessaires : *positionnement* des pièces, des organes ou des accessoires d'une machine, *contrôle des déplacements* des tables, *contrôle géométrique* des machines-outils, *contrôle géométrique et dimensionnel* des pièces (faux rond, parallélisme, épaisseur, profondeur, alésage.)

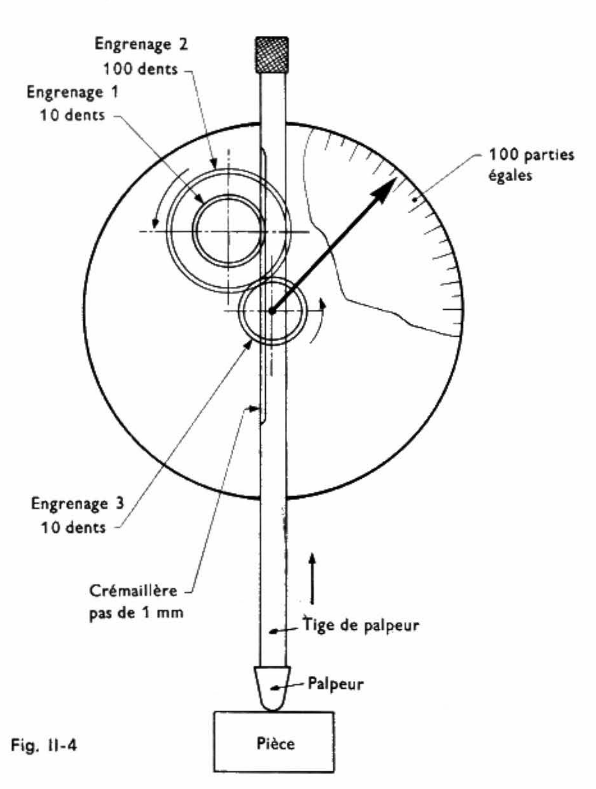


Fig. II-4

Schéma de principe d'un comparateur à amplification mécanique par engrenage. Lorsque le palpeur se déplace de 1 mm, l'engrenage 1 tourne d'un angle correspondant à une dent. L'engrenage 2 tourne du même angle mais il correspond à 10 dents sur cet engrenage. L'engrenage 3 fait un tour complet

L'amplification mécanique peut être obtenue de quatre manières : par engrenages (fig. II-4), par leviers, par combinaison engrenages-leviers, par ruban torsadé.

Les comparateurs à ruban torsadé sont plus de cent fois plus sensibles que les comparateurs à engrenages.

Remarque : Si la lecture peut être faite à $\frac{1}{200}$ mm près sur la plupart des comparateurs à amplification mécanique, la précision de mesure peut varier sensiblement du fait des nombreuses sources d'erreur dues au comparateur, à son positionnement par rapport à la pièce, à la rigidité de son support et au montage sur celui-ci. En particulier pour la vérification en série, il faut procéder à des étalonnages fréquents.

4.2.2. Comparateurs à amplification pneumatique. La mesure par amplification pneumatique consiste à transformer, directement ou indirectement, un écart de dimension en différence de pression d'air mesurable sur un indicateur étalonné (échelle graduée ou cadran).

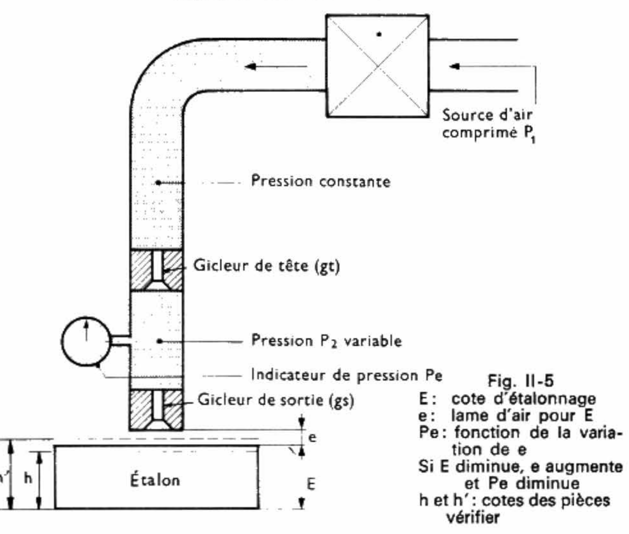


Fig. II-5

E : cote d'étalonnage
e : lame d'air pour E
Pe : fonction de la variation de e
Si E diminue, e augmente et Pe diminue
h et h' : cotes des pièces vérifier

1° *Principe de base* (fig. II-5). — De l'air, sous une pression constante P_1, traverse un gicleur de tête *gt* puis un gicleur de sortie *gs*. La pression P_2 qui règne entre ces deux gicleurs s'établit en fonction des variations du débit d'air à la sortie. Dans l'exemple ci-après, elle sera fonction de l'épaisseur de la lame d'air *e*, donc de la cote à mesurer, la pièce jouant le rôle d'obturateur. L'écoulement d'air peut être à basse pression ($\approx$ 0,6 bar) ou à haute pression ($\approx$ 2 à 3 bars). La tendance actuelle est d'utiliser la haute pression, surtout à l'atelier, pour la mesure sans contact, car elle permet d'éliminer l'huile ou les poussières qui recouvrent la pièce.

2° *Appareils utilisés.* — Différenciés par quelques détails techniques, les appareils utilisés en métrologie pneumatique comprennent toujours :

une *source d'air comprimé* issue d'un réseau général ou d'un compresseur autonome,

un *micromesureur* comprenant le régulateur de pression et l'indicateur de mesure,

un *dispositif de mesure*, variable avec la nature de la mesure à effectuer.

D'une utilisation simple, ces appareils robustes, précis (0,5 micromètre), fidèles, trouvent de nombreuses applications dans les ateliers de fabrication, les services de contrôle et les laboratoires de métrologie et d'essais.

a) *Micromesureur Solex* (fig. II-6). — Cet appareil est constitué par un réservoir *R* contenant un liquide à base de glycol dans lequel est placé un mobile *Mb* dont la partie supérieure forme le clapet *C*. L'air sous pression *P* provenant de la source d'air comprimé passe d'abord par le gicleur de détente *D* puis dans la chambre de détente *E* et dans le manomètre *M* ; la poussée exercée sur le clapet du

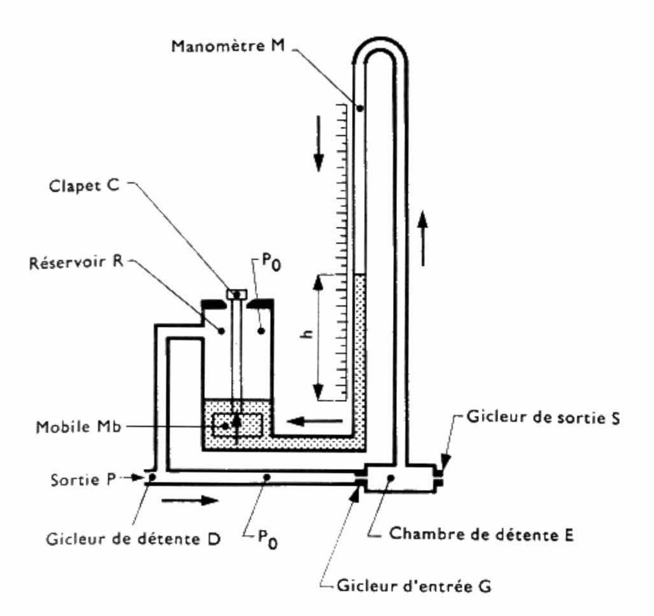


Fig. II-6 — Schéma d'un micromètre pneumatique

mobile compense alors le poids apparent de celui-ci (position d'équilibre). La pression P_0 ainsi obtenue en amont de la chambre de détente demeure constante, quelles que soient les variations de *P*. Ces variations n'ont d'autre effet que de provoquer un déplacement du mobile *Mb* et en conséquence une variation de débit d'air entre le clapet et son siège. La pression *p* qui règne entre le gicleur de tête *G* et le gicleur de sortie *S* dépend du rapport des sections de ces orifices. La section du gicleur de tête *G* étant fixe, le manomètre *M* enregistre fidèlement les variations de section du gicleur de sortie *S*. Si pour une section *S* correspondant à une pression *p*, la hauteur du liquide dans le tube manométrique est *h*, pour une section plus grande du gicleur de sortie, la pression *p* diminue et la hauteur *h* augmente. Pour une section plus petite de *S* les variations de *p* et de *h* seront inverses. La section du gicleur de tête est très petite, il faut donc une très faible variation de *S* pour que la pression *p* varie dans de fortes proportions. Cela permet d'obtenir des coefficients d'amplification très grands : 2 000 à 20 000 pour les appareils d'atelier, 20 000 à 100 000 pour les appareils de laboratoire. À chaque section de gicleur, repérée par une lettre, correspond une échelle de lecture étalonnée.

Il y a trois façons de faire varier la section du gicleur de sortie (fig II-7) :

— par **étranglement,** principe étudié ci-dessus (le gicleur de sortie représente la pièce à vérifier) ;

— par **laminage direct,** la section du gicleur de sortie reste constante, le débit d'air varie avec la distance (très faible entre le gicleur et la pièce à mesurer) ;

— par **laminage indirect** (le plus utilisé) : le gicleur de sortie est remplacé par un obturateur ou amplificateur, dont la tige terminée par un palpeur approprié repose sur la pièce à mesurer. Le débit d'air varie en fonction du déplacement de l'obturateur, donc des variations de dimensions des pièces à vérifier.

Le principe décrit ci-dessus est celui de l'appareil à basse pression, le manomètre enregistrant intégralement les variations de la pression *p*. Dans les appareils à haute pression, afin d'éviter un manomètre aux dimensions trop grandes, on double le gicleur de tête *G* d'un gicleur *G'* ; dans la chambre de détente il règne alors une pression *p* entre ces deux gicleurs et une pression *p'* entre le gicleur *G'* et le gicleur *S* (cela a pour but de limiter l'importance des variations de pression résultant directement de *S*). Ce type d'appareil est utilisé exclusivement pour les mesures sans contact.

Les appareils de contrôle adoptés sur le micromesureur Solex sont très nombreux (fig. II-8 a et b) :

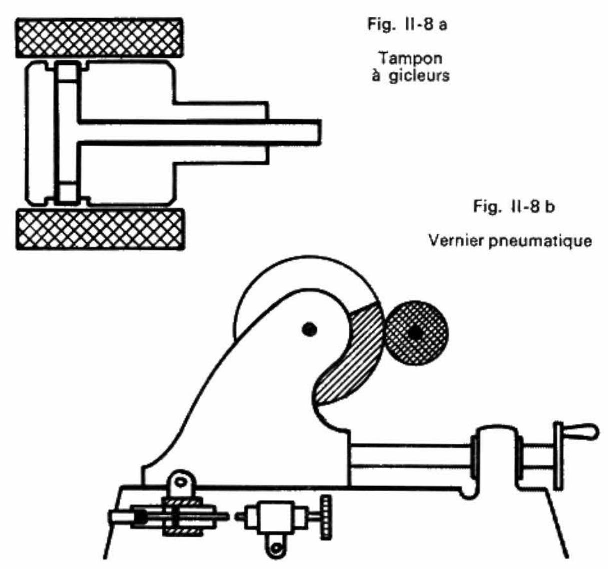


Fig. II-8 a

Tampon à gicleurs

Fig. II-8 b

Vernier pneumatique

— pour les contrôles des dimensions extérieures : comparateur à gicleur, comparateur à touche palmer, sphéromètre ;

— pour le contrôle des dimensions intérieures : tampons à gicleurs, tampons pilotes (mesure avec contact), compas d'intérieur ;

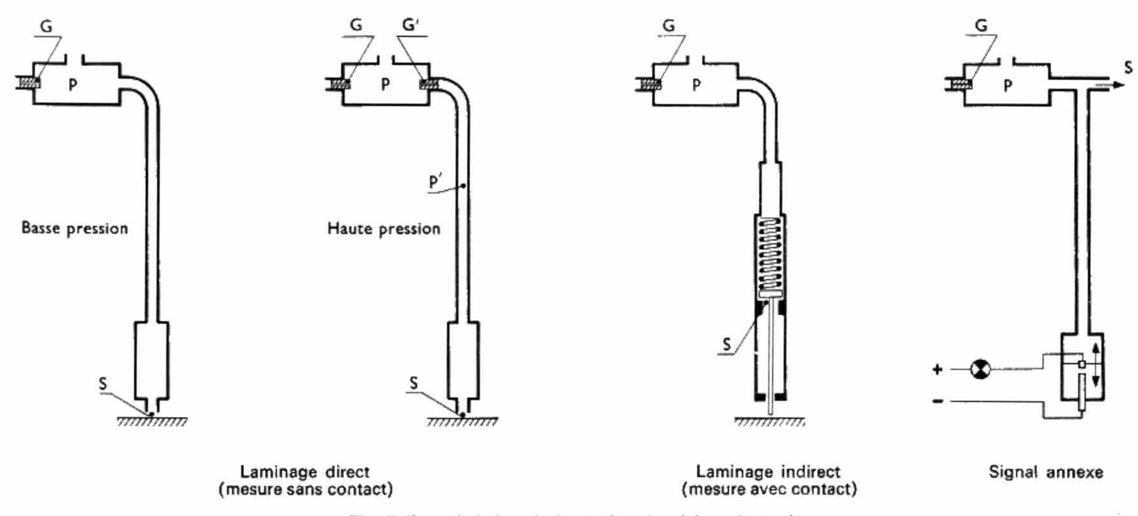


Fig. II-7 — Variation de la section du gicleur de sortie

— pour l'équipement des machines-outils : jauge de calibrage, manocontacteur ou stop-cote, vernier pneumatique, micromesureur multilecture ;

— en laboratoire d'essais : extensomètre, dynamomètre ; en automation : manocontacteur, asservissement, tri, etc.

b) *Comparateur Étamic* (fig. II-9). — Cet appareil fonctionne exclusivement en « haute pression » (aux environs de 2 bars) ce qui correspond à une pression d'alimentation de 4 à 5 bars. Après étalonnage, les différences de cote des pièces à mesurer sont lues sur le cadran d'une montre de comparateur liée au système pneumatique.

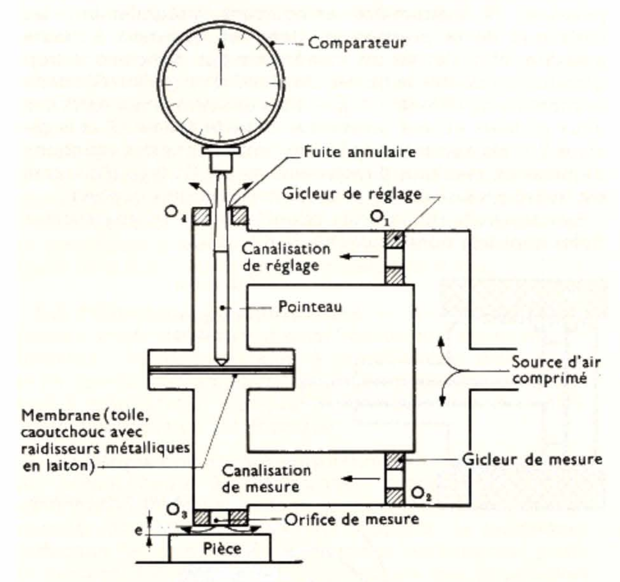


Fig. II-9 — Principe de l'appareil Étamic. L'appareil recherche toujours la position d'équilibre donnant l'égalité des pressions dans les deux canalisations

Principe : L'appareil comprend essentiellement deux canalisations disposées en parallèle et séparées par une membrane souple et étanche. L'air sous pression provenant de la source d'alimentation traverse deux gicleurs calibrés O_1 et O_2 et s'échappe, d'une part, par l'orifice de mesure O_3, dont la section dépend de l'épaisseur *e* de la lame d'air entre la buse de sortie et la pièce à mesurer, d'autre part, par l'orifice O_4 dénommé fuite annulaire, dont la section d'écoulement dépend de la position du pointeau. Pour un débit d'air déterminé à la buse de sortie et pour une lame d'air d'épaisseur *e* bien définie, il n'existe qu'une position du pointeau pour laquelle l'équilibre des pressions dans les deux chambres est réalisé. À partir de cette valeur, toute variation de *e* entraîne une déformation de la membrane et une modification de la position du pointeau ; il en résulte une variation de la section de la fuite annulaire jusqu'à ce que l'équilibre des pressions dans les deux chambres soit rétabli. Cette nouvelle position du pointeau est repérée sur la montre du comparateur par la rotation de l'aiguille. Les écarts entre la pièce à vérifier et l'étalon sont traduits directement.

Le comparateur Étamic existe sous différentes formes, adaptées à la nature du contrôle à réaliser : mesure directe, mesure différentielle, mesure des jeux ou des serrages. Chaque appareil est caractérisé par la valeur des gicleurs du distributeur d'air, du pointeau, des fuites additionnelles. Cela permet d'obtenir des précisions de mesure de 0,125 à 2 micromètres. Comme pour l'appareil Solex, les nombreux organes de mesure adaptés aux différents modèles de comparateurs permettent de faire tous les contrôles de fabrication, unitaires ou en série (classement en appariement, contrôle automatique sur machines-outil, laminoir, boudineuse, etc.). Très simple, très robuste, d'un emploi facile, l'appareil Étamic est beaucoup utilisé en fabrications mécaniques.

4.2.3. Comparateurs à amplification optique. — Tout appareil optique comprend essentiellement : une source de lumière, éventuellement solidaire de l'appareil et un dispositif optique composé de miroirs plans, prismes, lentilles, etc. La combinaison et la disposition de ces éléments optiques permettent d'obtenir une précision de mesure pouvant atteindre 0,1 micromètre.

Comparés aux appareils pneumatiques, les appareils optiques sont d'un coût beaucoup plus élevé et ils ne permettent pas la même variété de contrôles. Ils nécessitent un soin tout particulier et c'est pourquoi ils sont surtout utilisés dans les laboratoires de métrologie.

1° *Optimètre.* — Cet appareil (fabriqué par la Société S.A.G.E.M.) permet une appréciation de lecture du 1/10 de micromètre, ce qui entraîne une précision de mesure de 1 micromètre. Basé sur le principe du levier optique, il permet d'atteindre une amplification de 1 000 pour une capacité de mesure de $\pm$ 100 μm.

Principe de l'appareil (fig. II-10). — L'image d'une graduation fixe, gravée sur la partie opaque d'une lame de verre éclairée par une source lumineuse, est dirigée sur un miroir (foyer de l'objectif) qui la réfléchit sur la partie transparente de cette même lame de verre. Le pinceau lumineux est dévié au moyen d'un prisme et de lentilles convenablement disposées.

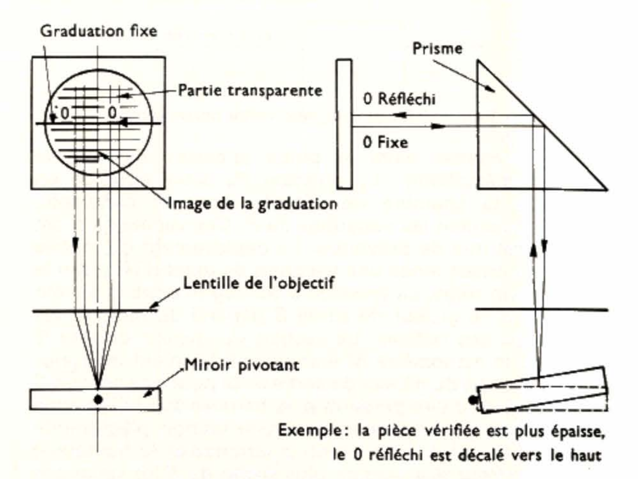
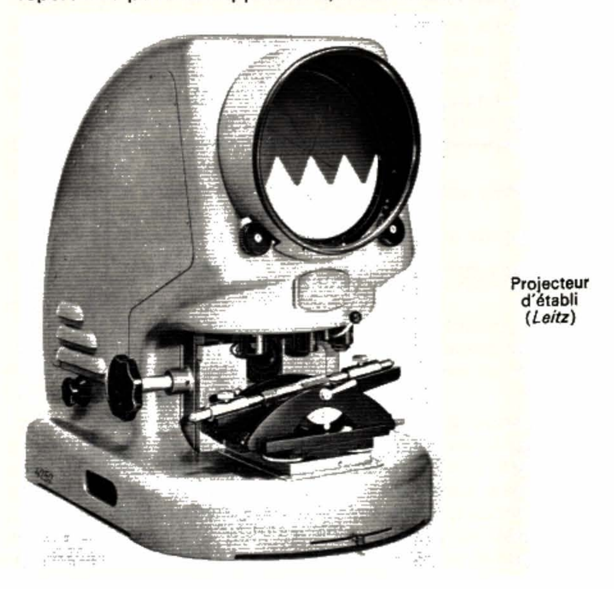


Fig. II-10 — Schéma de principe de l'optimètre

À l'étalonnage de l'appareil, l'image du zéro de la graduation fixe doit coïncider avec un trait de repère 0 gravé sur la partie transparente : le miroir est alors parallèle à la table de mesure. Ensuite, tout déplacement de l'image de la graduation fixe par rapport à ce trait repère est fonction des variations de cotes enregistrées par un palpeur agissant sur le miroir pivotant. Un vernier situé de part et d'autre du repère fixe permet d'apprécier 0,1 micromètre.



Projecteur d'établi (*Leitz*)

Tableau des écarts fondamentaux des arbres

Écart fondamental	Écart supérieur (es)												Écart inférieur (ei)																		
Symbole — Lettre	a*	b*	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	j_s	j			k		m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
Symbole — Qualité	Toutes qualités												5 et 6	7	8	4 à 7	≤ 3 > 7	Toutes qualités													
Écarts fondamentaux en micromètres (1 μm = 0,001 mm) pour paliers de diamètres en millimètres: * < 3	− 270	− 140	− 60	− 34	− 20	− 14	− 10	− 6	− 4	− 2	0	Écarts limites = $\pm \frac{IT^{**}}{2}$	− 2	− 4	− 6	0	0	+ 2	+ 4	+ 6	+ 10	+ 14	—	+ 18	—	+ 20	—	+ 26	+ 32	+ 40	+ 60
> 3 à 6	− 270	− 140	− 70	− 46	− 30	− 20	− 14	− 10	− 6	− 4	0		− 2	− 4	—	+ 1	0	+ 4	+ 8	+ 12	+ 15	+ 19	+—	+ 23	—	+ 23	—	+ 35	+ 42	+ 50	+ 80
> 6 à 10	− 280	− 150	− 80	− 56	− 40	− 25	− 18	− 13	− 8	− 5	0		− 2	− 5	—	+ 1	0	+ 6	+ 10	+ 15	+ 19	+ 23	+—	+ 28	—	+ 34	—	+ 42	+ 52	+ 67	+ 97
> 10 à 14	− 290	− 150	− 95	—	− 50	− 32	—	− 16	—	− 6	0		− 3	− 6	—	+ 1	0	+ 7	+ 12	+ 18	+ 23	+ 28	—	+ 33	—	+ 40	—	+ 50	+ 64	+ 90	+ 130
> 14 à 18																									+ 39	+ 45	—	+ 60	+ 77	+ 108	+ 150
> 18 à 24	− 300	− 160	− 110	—	− 65	− 40	—	− 20	—	− 7	0		− 4	− 8	—	+ 2	0	+ 8	+ 15	+ 22	+ 28	+ 35	—	+ 41	+ 47	+ 54	+ 63	+ 73	+ 98	+ 136	+ 188
> 24 à 30																							+ 41	+ 48	+ 55	+ 64	+ 75	+ 88	+ 118	+ 160	+ 218
> 30 à 40	− 310	− 170	− 120	—	− 80	− 50	—	− 25	—	− 9	0		− 5	− 10	—	+ 2	0	+ 9	+ 17	+ 26	+ 34	+ 43	+ 48	+ 60	+ 68	+ 80	+ 94	+ 112	+ 148	+ 200	+ 274
> 40 à 50	− 320	− 180	− 130																				+ 54	+ 70	+ 81	+ 97	+ 114	+ 136	+ 180	+ 242	+ 325
> 50 à 65	− 340	− 190	− 140	—	− 100	− 60	—	− 30	—	− 10	0		− 7	− 12	—	+ 2	0	+ 11	+ 20	+ 32	+ 41	+ 53	+ 66	+ 87	+ 102	+ 122	+ 144	+ 172	+ 226	+ 300	+ 405
> 65 à 80	− 360	− 200	− 150																		+ 43	+ 59	+ 75	+ 102	+ 120	+ 146	+ 174	+ 210	+ 274	+ 360	+ 480
> 80 à 100	− 380	− 220	− 170	—	− 120	− 72	—	− 36	—	− 12	0		− 9	− 15	—	+ 3	0	+ 13	+ 23	+ 37	+ 51	+ 71	+ 91	+ 124	+ 146	+ 178	+ 214	+ 258	+ 335	+ 445	+ 585
> 100 à 120	− 410	− 240	− 180																		+ 54	+ 79	+ 104	+ 144	+ 172	+ 210	+ 254	+ 310	+ 400	+ 525	+ 690
> 120 à 140	− 460	− 260	− 200	—	− 145	− 85	—	− 43	—	− 14	0		− 11	− 18	—	+ 3	0	+ 15	+ 27	+ 43	+ 63	+ 92	+ 122	+ 170	+ 202	+ 248	+ 300	+ 365	+ 470	+ 620	+ 800
> 140 à 160	− 520	− 280	− 210																		+ 65	+ 100	+ 134	+ 190	+ 228	+ 280	+ 340	+ 415	+ 535	+ 700	+ 900
> 160 à 180	− 580	− 310	− 230																		+ 68	+ 108	+ 146	+ 210	+ 252	+ 310	+ 380	+ 465	+ 600	+ 780	+ 1000
> 180 à 200	− 660	− 340	− 240	—	− 170	− 100	—	− 50	—	− 15	0		− 13	− 21	—	+ 4	0	+ 17	+ 31	+ 50	+ 77	+ 122	+ 166	+ 236	+ 284	+ 350	+ 425	+ 520	+ 670	+ 880	+ 1150
> 200 à 225	− 740	− 380	− 260																		+ 80	+ 130	+ 180	+ 258	+ 310	+ 385	+ 470	+ 575	+ 740	+ 960	+ 1250
> 225 à 250	− 820	− 420	− 280																		+ 84	+ 140	+ 196	+ 284	+ 340	+ 425	+ 520	+ 640	+ 820	+ 1050	+ 1350
> 250 à 280	− 920	− 480	− 300	—	− 190	− 110	—	− 56	—	− 17	0		− 16	− 26	—	+ 4	0	+ 20	+ 34	+ 56	+ 94	+ 158	+ 218	+ 315	+ 385	+ 475	+ 580	+ 710	+ 920	+ 1200	+ 1550
> 280 à 315	− 1050	− 540	− 330																		+ 98	+ 170	+ 240	+ 350	+ 425	+ 525	+ 650	+ 790	+ 1000	+ 1300	+ 1700
> 315 à 355	− 1200	− 600	− 360	—	− 210	− 125	—	− 62	—	− 18	0		− 18	− 28	—	+ 4	0	+ 21	+ 37	+ 62	+ 108	+ 190	+ 268	+ 390	+ 475	+ 590	+ 730	+ 900	+ 1150	+ 1500	+ 1900
< 355 à 400	− 1350	− 680	− 400																		+ 114	+ 208	+ 294	+ 435	+ 530	+ 660	+ 820	+ 1000	+ 1300	+ 1650	+ 2100
> 400 à 450	− 1500	− 760	− 440	—	− 230	− 135	—	− 68	—	− 20	0		− 20	− 32	—	+ 5	0	+ 23	+ 40	+ 68	+ 126	+ 232	+ 330	+ 490	+ 595	+ 740	+ 920	+ 1100	+ 1450	+ 1850	+ 2400
> 450 à 500	− 1650	− 840	− 480																		+ 132	+ 252	+ 360	+ 540	+ 660	+ 820	+ 1000	+ 1250	+ 1600	+ 2100	+ 2600

* Les arbres a et b ne sont prévus qu'au-delà de 1 mm.

** Pour j_s des qualités 7 à 11, arrondir la valeur de IT en micromètres, si elle est impaire, à la valeur paire immédiatement inférieure.

Note. — Les valeurs numériques modifiées par rapport à celles résultant de l'ancien système ISA sont encadrées d'un trait fort

TOLÉRANCES DE PIÈCES LISSES (SYSTÈME ISO)

Tableau des écarts fondamentaux des alésages

Écarts fondamentaux en micromètres (1 µm = 0,001 mm), pour paliers de diamètres en millimètres

Écart fondamental	Écart inférieur (EI)												Écart supérieur (ES)										
Symbole – Lettre	A*	B*	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	Js	J			K		M		N		P à ZC	P
Symbole – Qualité	Toutes qualités												6	7	8	< 8	> 8	< 8	> 8	< 8	> 8*	< 7	> 7
* < 3	+ 270	+ 140	+ 60	+ 34	+ 20	+ 14	+ 10	+ 6	+ 4	+ 2	0	Écarts limites = $\pm \frac{IT^{**}}{2}$	+ 2	+ 4	+ 6	0	0	− 2	− 2	− 4	− 4	Même écart, augmenté de Δ, que pour les qualités > 7	− 6
> 3 à 6	+ 270	+ 140	+ 70	+ 46	+ 30	+ 20	+ 14	+ 10	+ 6	+ 4	0		+ 5	+ 6	+ 10	−1+Δ	0	− 4+Δ	− 4	− 8+Δ	0		−12
> 6 à 10	+ 280	+ 150	+ 80	+ 56	+ 40	+ 25	+ 18	+ 13	+ 8	+ 5	0		+ 5	+ 8	+ 12	−1+Δ	0	− 6+Δ	− 6	−10+Δ	0		−15
> 10 à 14	+ 290	+ 150	+ 95	—	+ 50	+ 32	—	+ 16	—	+ 6	0		+ 6	+ 10	+ 15	−1+Δ	0	− 7+Δ	− 7	−12+Δ	0		−18
> 14 à 18																							
> 18 à 24	+ 300	+ 160	+ 110	—	+ 65	+ 40	—	+ 20	—	+ 7	0		+ 8	+ 12	+ 20	−2+Δ	0	− 8+Δ	+ 8	−15+Δ	0		−22
> 24 à 30																							
> 30 à 40	+ 310	+ 170	+ 120	—	+ 80	+ 50	—	+ 25	—	+ 9	0		+ 10	+ 14	+ 24	−2+Δ	0	− 9+Δ	− 9	−17+Δ	0		−26
> 40 à 50	+ 320	+ 180	+ 130																				
> 50 à 65	+ 340	+ 190	+ 140	—	+ 100	+ 60	—	+ 30	—	+ 10	0		+ 13	+ 18	+ 28	−2+Δ	0	−11+Δ	−11	−20+Δ	0		−32
> 65 à 80	+ 360	+ 200	+ 150																				
> 80 à 100	+ 380	+ 220	+ 170	—	+ 120	+ 72	—	+ 36	—	+ 12	0		+ 16	+ 22	+ 34	−3+Δ	0	−13+Δ	−13	−23+Δ	0		−37
> 100 à 120	+ 410	+ 240	+ 180																				
> 120 à 140	+ 460	+ 260	+ 200	—	+ 145	+ 85	—	+ 43	—	+ 14	0		+ 18	+ 26	+ 41	−3+Δ	0	−15+Δ	−15	−27+Δ	0		−43
> 140 à 160	+ 520	+ 280	+ 210																				
> 160 à 180	+ 580	+ 310	+ 230																				
> 180 à 200	+ 660	+ 340	+ 240	—	+ 170	+ 100	—	+ 50	—	+ 15	0		+ 22	+ 30	+ 47	−4+Δ	0	−17+Δ	−17	−31+Δ	0		−50
> 200 à 225	+ 740	+ 380	+ 260																				
> 225 à 250	+ 820	+ 420	+ 280																				
> 250 à 280	+ 920	+ 480	+ 300	—	+ 190	+ 110	—	+ 56	—	+ 17	0		+ 25	+ 36	+ 55	−4+Δ	0	−20+Δ ***	−20	−34+Δ	0		−56
> 280 à 315	+ 1050	+ 540	+ 330																				
> 315 à 355	+ 1200	+ 600	+ 360	—	+ 210	+ 125	—	+ 62	—	+ 18	0		+ 29	+ 39	+ 60	−4+Δ	0	−21+Δ	−21	−37+Δ	0		−62
> 355 à 400	+ 1350	+ 680	+ 400																				
> 400 à 450	+ 1500	+ 760	+ 440	—	+ 230	+ 135	—	+ 68	—	+ 20	0		+ 33	+ 43	+ 66	−5+Δ	0	−23+Δ	−23	−40+Δ	0		−68
> 450 à 500	+ 1650	+ 840	+ 480																				

Écart fondamental	Écart supérieur (ES)											Δ en micromètres					
Symbole – Lettre	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC						
Symbole – Qualité	> 7											3	4	5	6	7	8
* < 3	− 10	− 14	—	− 18	—	− 20	—	− 26	− 32	− 40	− 60			Δ = 0			
> 3 à 6	− 15	− 19	—	− 23	—	− 28	—	− 35	− 42	− 50	− 80	1	1,5	1	3	4	6
> 6 à 10	− 19	− 23	—	− 28	—	− 34	—	− 42	− 52	− 67	− 97	1	1,5	2	3	6	7
> 10 à 14	− 23	− 28	—	− 33	—	− 40	—	− 50	− 64	− 90	− 130	1	2	3	3	7	9
> 14 à 18					− 39	− 45	—	− 60	− 77	− 108	− 150						
> 18 à 24	− 28	− 35	—	− 41	− 47	− 54	− 63	− 73	− 98	− 136	− 188	1,5	2	3	4	8	12
> 24 à 30			− 41	− 48	− 55	− 64	− 75	− 88	− 118	− 160	− 218						
> 30 à 40	− 34	− 43	− 48	− 60	− 68	− 80	− 94	− 112	− 148	− 200	− 274	1,5	3	4	5	9	14
> 40 à 50			− 54	− 70	− 81	− 97	− 114	− 136	− 180	− 242	− 325						
> 50 à 65	− 41	− 53	− 66	− 87	− 102	− 122	− 144	− 172	− 226	− 300	− 405	2	3	5	6	11	16
> 65 à 80	− 43	− 59	− 75	− 102	− 120	− 146	− 174	− 210	− 274	− 360	− 480						
> 80 à 100	− 51	− 71	− 91	− 124	− 146	− 178	− 214	− 258	− 335	− 445	− 585	2	4	5	7	13	19
> 100 à 120	− 54	− 79	− 104	− 144	− 172	− 210	− 254	− 310	− 400	− 525	− 690						
> 120 à 140	− 63	− 92	− 122	− 170	− 202	− 248	− 300	− 365	− 470	− 620	− 800	3	4	6	7	15	23
> 140 à 160	− 65	− 100	− 134	− 190	− 228	− 280	− 340	− 415	− 535	− 700	− 900						
> 160 à 180	− 68	− 108	− 146	− 210	− 252	− 310	− 380	− 465	− 600	− 780	− 1000						
> 180 à 200	− 77	− 122	− 166	− 236	− 284	− 350	− 425	− 520	− 670	− 880	− 1150	3	4	6	9	17	26
> 200 à 225	− 80	− 130	− 180	− 258	− 310	− 385	− 470	− 575	− 740	− 960	− 1250						
> 225 à 250	− 84	− 140	− 196	− 284	− 340	− 425	− 520	− 640	− 820	− 1050	− 1350						
> 250 à 280	− 94	− 158	− 218	− 315	− 385	− 475	− 580	− 710	− 920	− 1200	− 1550	4	4	7	9	20	29
> 280 à 315	− 98	− 170	− 240	− 350	− 425	− 525	− 650	− 790	− 1000	− 1300	− 1700						
> 315 à 355	− 108	− 190	− 268	− 390	− 475	− 590	− 730	− 900	− 1150	− 1500	− 1900	4	5	7	11	21	32
> 355 à 400	− 114	− 208	− 294	− 435	− 530	− 660	− 820	− 1000	− 1300	− 1650	− 2100						
> 400 à 450	− 126	− 232	− 330	− 490	− 595	− 740	− 920	− 1100	− 1450	− 1850	− 2400	5	5	7	13	23	34
> 450 à 500	− 132	− 252	− 360	− 540	− 660	− 820	− 1000	− 1250	− 1600	− 2100	− 2600						

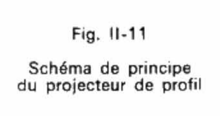
* Les écarts A et B et les écarts N des qualités supérieures à 8 ne sont prévus qu'au-delà de 1 mm.

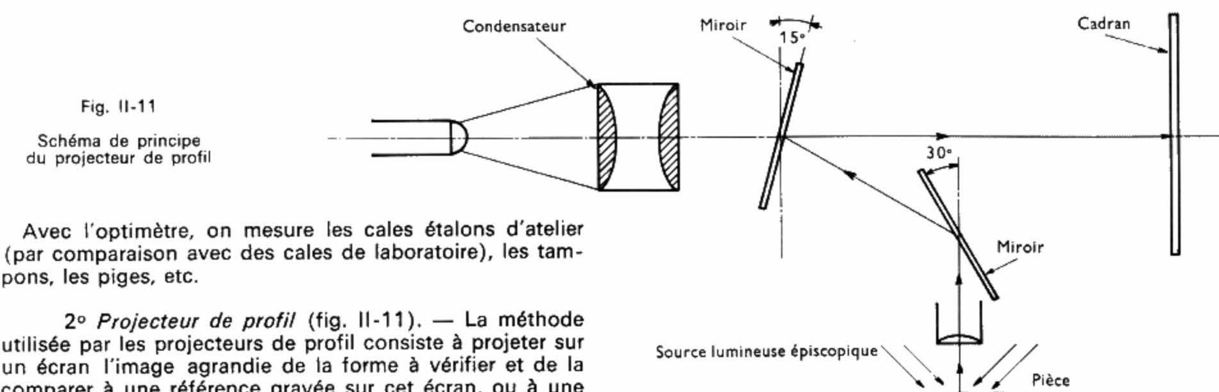
** Pour J_s des qualités 7 à 11, arrondir la valeur de IT en micromètres, si elle est impaire, à la valeur paire immédiatement inférieure.

*** Exception : Pour M6 seulement, de 250 à 315, ES = −9 (au lieu de −11)

Valeurs de Δ. Pour les écarts comportant le terme additif Δ, prendre les valeurs de celui-ci dans les colonnes de droite.
Exemple : Pour P7 de 18 à 30 : Δ = 8, d'où ES = − 14.

Note. — Les valeurs numériques modifiées par rapport à celles résultant de l'ancien sytème ISA sont encadrées d'un trait fort.


Fig. II-11
Schéma de principe du projecteur de profil



Avec l'optimètre, on mesure les cales étalons d'atelier (par comparaison avec des cales de laboratoire), les tampons, les piges, etc.

2° *Projecteur de profil* (fig. II-11). — La méthode utilisée par les projecteurs de profil consiste à projeter sur un écran l'image agrandie de la forme à vérifier et de la comparer à une référence gravée sur cet écran, ou à une épure tracée sur une matière transparente à l'échelle de projection. La projection peut être :

— *diascopique :* la source lumineuse est située en dessous de la table transparente, support de pièce; la pièce à vérifier formant écran à la lumière apparaît en sombre sur l'écran éclairé (ombre chinoise) ;

— ou bien *épiscopique*, la source lumineuse est située au-dessus de la table support de pièce (fig. II-12). La surface extérieure de la pièce éclairée et les détails apparaissent par réflexion sur l'écran.

Certains appareils sont équipés des deux sources lumineuses et permettent la projection séparée ou simultanée du profil et des détails de la surface de la pièce à vérifier. La précision de mesure directe sur écran est voisine du dixième de millimètre. Pour ces appareils les grossissements atteignent 10, 20, 50 ou 100 pour des écrans de diamètres compris entre 200 mm et 1 m. La précision de mesure est donc sensiblement de 10 µm avec un grossissement de 10 et de 2 µm avec un grossissement de 100. Pouvant être équipés de tables et de supports d'écran à déplacements contrôlés, ces appareils sont très utilisés dans les ateliers et les services de contrôle. Les contrôles de formes qui ne peuvent être faits efficacement sur les appareils étudiés aux paragraphes précédents (denture de roue, filet de vis, profil d'outil, pièce d'horlogerie, relief de moule métallique, etc.) sont réalisés rapidement et avec précision sur ces appareils.

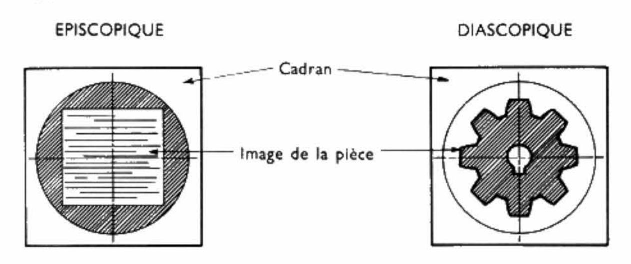


Fig. II-12 — Disposition de la source lumineuse

3° *Interféromètre.* — Bien que l'interféromètre soit surtout un appareil de laboratoire et de recherche plutôt qu'un appareil de mesure industrielle, on le décrira sommairement pour souligner au lecteur les impératifs de la mesure pour toute pièce fabriquée, fût-elle de haute précision. L'étalon n'échappant pas à cette règle, il a donc fallu trouver un moyen en rapport avec la précision exceptionnelle imposée par ce qu'il représente. L'interférométrie est à l'heure actuelle la seule méthode utilisable pour mesurer les cales étalons.

a) *Rappel de physique.* — On sait que si deux pinceaux lumineux sont issus d'une même source (donc correspondent à des radiations lumineuses de *même fréquence* et *en phase*) il se produit des interférences lumineuses. En un point, l'intensité lumineuse est égale à chaque instant à la somme algébrique des intensités lumineuses; cette intensité dépend de la différence *d* entre les trajets suivis par les deux radiations qui interfèrent au point considéré. L'intensité est maximale lorsque les radiations sont en phase (fig. II-13 a) c'est-à-dire lorsque *d* est égal à un nombre entier de longueurs d'onde (produit de la vitesse de la lumière et de la période de la vibration lumineuse). L'intensité est nulle lorsque les radiations sont en opposition de phase (fig. II-13 b). Cette condition est réalisée lorsque *d* est égal à un nombre impair de demi-longueurs d'onde. Dans un plan on obtient une succession de zones claires et de zones sombres appelées *franges d'interférences*, leur forme géométrique (raie, anneau) dépendant du dispositif utilisé.

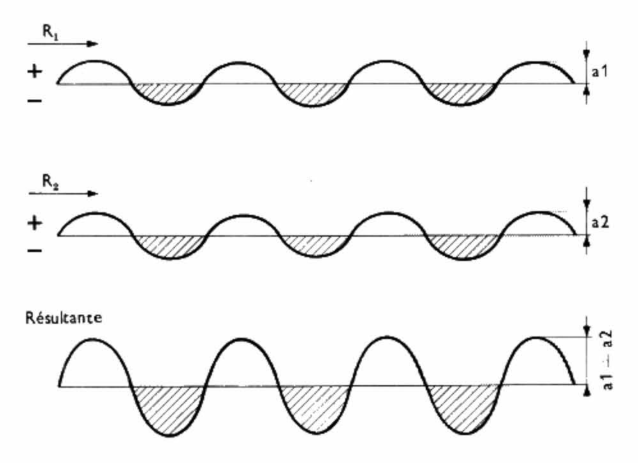


Fig. II-13 a — Ondes en concordance de phases. L'amplitude de l'onde résultante est égale à la somme des amplitudes des ondes composantes. Franges brillantes

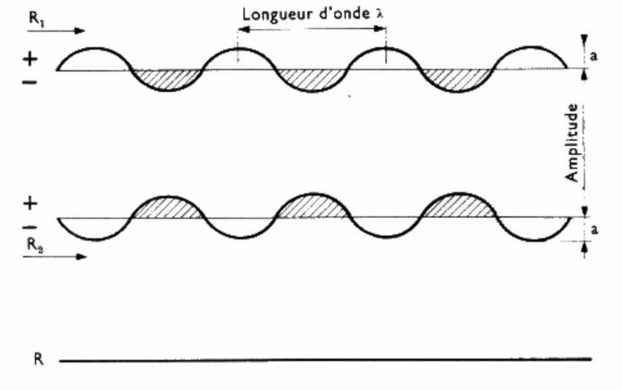


Fig. II-13 b — Ondes en opposition de phases. L'amplitude de l'onde résultante est nulle. l'interférence est totale. Franges obscures

Source de lumière
Séparateur d'onde
Condensateur
Miroir fixe (R)
A
Lame compensatrice
L_1 Miroir semi-argenté (diviseur d'onde)
a
a
a
b
Œil
Lunette de visée
Images des interférences
b
b
Microscopes
Règle étalon
Miroir réglable
M

Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson

Fig. II-14
Interféromètre de Michelson (*Palais de la Découverte*)

b) *Principe de l'interférométrie de Michelson* (fig. II-14). — Une lame de verre L_1 semi-argentée reçoit un faisceau lumineux monochromatique de rayons parallèles *A*. Ce faisceau est séparé en deux demi-faisceaux *a* et *b*. Le demi-faisceau *a*, après avoir été réfléchi par un miroir plan fixe *R*, revient dans la lunette de visée. Le demi-faisceau *b* est réfléchi par un miroir plan réglable *M* et il revient également dans la lunette. Il parcourt un trajet dont la longueur dépend de la position du miroir mobile *M*. Les demi-faisceaux *a* et *b* peuvent interférer au niveau de la lunette : on obtient des franges claires alternant avec des franges sombres. Si l'on déplace le miroir *M* lentement, une zone claire succède à une zone obscure au centre de la lunette d'observation chaque fois que le déplacement atteint une demi-longueur d'onde. Dans la pratique, on ne compte pas les franges, mais on fait plusieurs mesures avec des sources lumineuses monochromatiques différentes, de longueurs d'onde connues.

Pour la vérification géométrique des surfaces on observe la disposition des franges (fig. II-15) :

— *Surfaces planes :* les franges sont rectilignes, parallèles et équidistantes.

— *Surfaces parallèles :* les franges du support de référence (étalon) et celles de la surface à vérifier sont dans le même prolongement.

Cette méthode de mesure exige des précautions draconiennes en ce qui concerne le milieu ambiant (température, humidité, pression atmosphérique, absence de poussière) et doit être utilisée pour des surfaces ayant une qualité géométrique très précise, comparable à celle d'un miroir (qualité de rodage). À l'heure actuelle, l'électronique permet de réaliser des interféromètres d'un fonctionnement à peu près automatique, la lecture des résultats se faisant directement sur un compteur. Ces appareils n'ont toutefois pas la précision des précédents (0,1 micromètre). On utilise

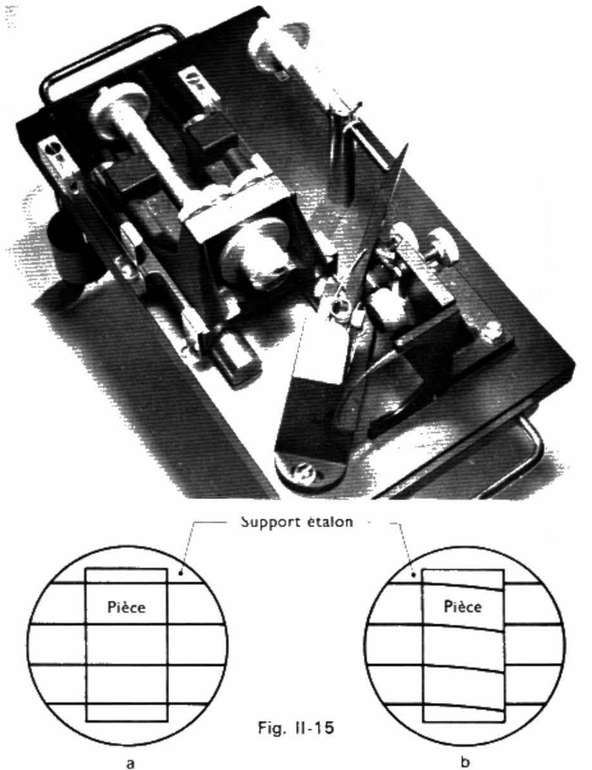
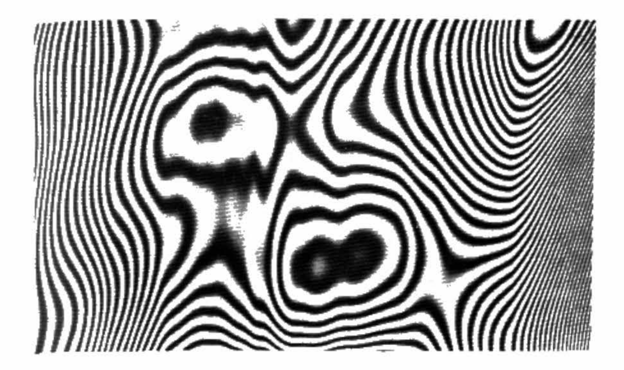


Fig. II-15

Franges obtenues dans le cas où la surface à vérifier est parallèle à celle du support (a) et n'est pas parallèle à celle-ci (b)



Franges d'égale épaisseur d'une lame de verre

également la méthode interférentielle pour la mesure des états de surface (rugomètre).

4.2.4. Comparateurs à amplification électrique et électronique. — Après l'électricité, l'électronique s'est imposée dans les laboratoires de métrologie et les ateliers de fabrication. Nombreux sont les appareils qui permettent une vérification précise, fidèle, rapide, directe ou automatique des pièces usinées ou des produits élaborés. Des amplificateurs mettant en œuvre des transistors (V. t. 1, Électronique, chap. 8) peuvent jouer le rôle de leviers amplificateurs sans limite apparente et sans les défauts des leviers mécaniques (l'amplification fournie peut atteindre 100 000). On peut classer les appareils électroniques en deux catégories :

— ceux qui, munis d'un palpeur, fonctionnent par contact ; ces appareils sont utilisés pour le contrôle ou le triage des pièces mécaniques ;

— ceux qui permettent de mesurer sans contact. Ils sont

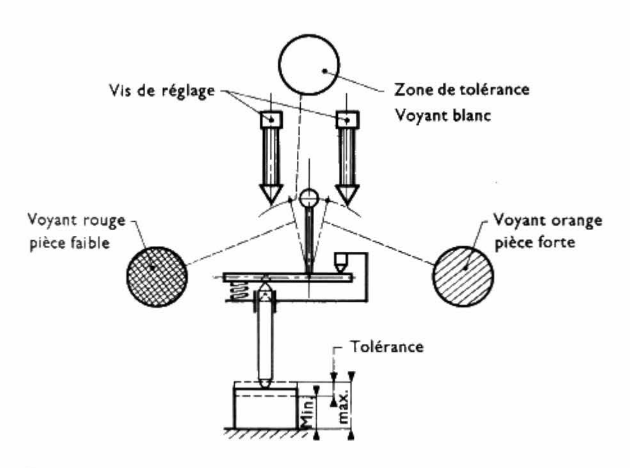
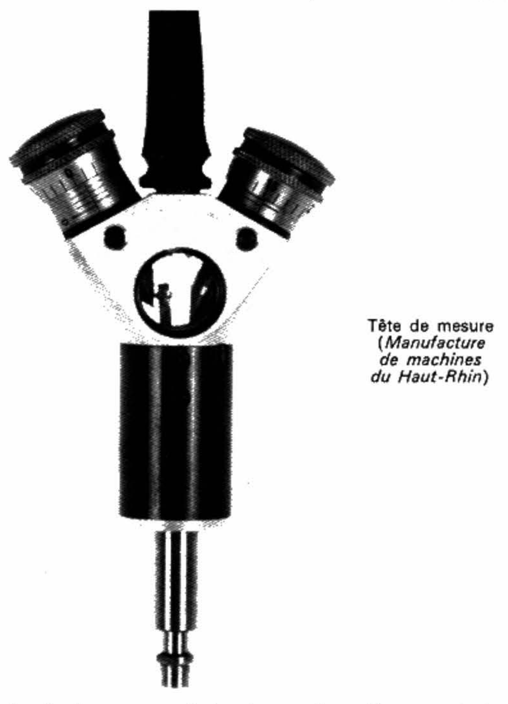


Fig. II-16 — Schéma de principe d'un appareil à voyants lumineux (les liaisons électriques ne sont pas représentées)

surtout utilisés par le contrôle en cours de fabrication de produits obtenus en continus.

1° *Appareils électromécaniques à voyants lumineux* (fig. II-16). — Employés pour le contrôle des pièces fabriquées en série, ces appareils donnent, en fonction des cotes réelles, des indications qui sont liées à l'éclairement



Tête de mesure (*Manufacture de machines du Haut-Rhin*)

de plusieurs voyants lumineux. Les pièces sont classées en trois catégories : pièces fortes, bonnes (dans la zone de tolérance), faibles. La tête de mesure est un amplificateur à leviers comportant un plot de contact se situant entre deux bornes réglables. Plot et bornes sont liés à un ensemble de trois circuits électriques. La mise en contact du plot avec l'une des bornes entraîne l'allumage des lampes correspondantes. Le réglage de la position des bornes, contrôlé par tambours gradués, se fait en fonction de la valeur et de la position de la tolérance des pièces à usiner. Il est réalisé au moyen de cales étalons ou de pièces types.

2° *Comparateurs électroniques* (fig. II-17). — Ils permettent d'effectuer des mesures avec une précision de 0,1 micromètre. Ils sont utilisés pour le contrôle statistique d'une production en série ou pour le triage des pièces en vue d'appairage. La tête de mesure comprend un palpeur en contact avec la pièce à mesurer. Les différences de position du palpeur produisent des variations d'une grandeur électrique. Celle-ci est appliquée à l'entrée d'un amplificateur qui délivre un courant de sortie mesuré au moyen d'un galvanomètre qui peut être gradué en micromètres et fractions de micromètres.

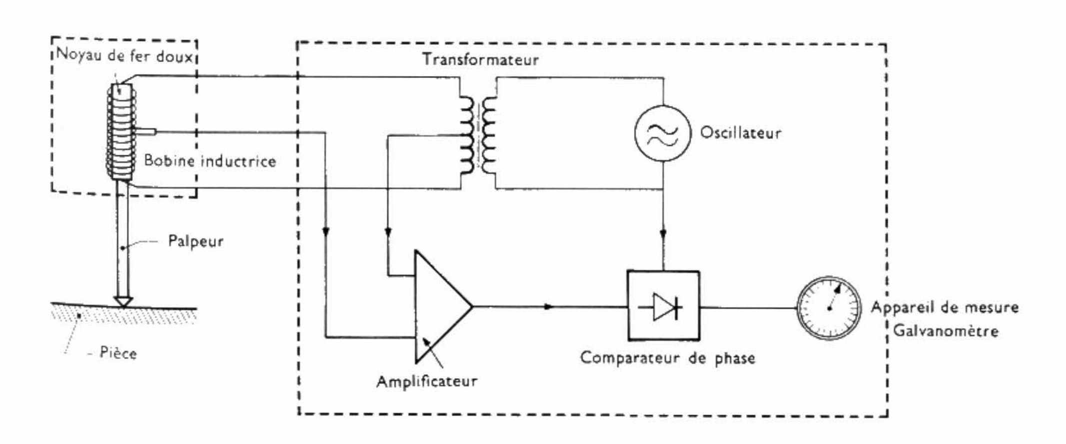


Fig. II-17

CHAPITRE III

CONTRÔLES SPÉCIAUX

1. GÉNÉRALITÉS

Dans les précédents chapitres seuls ont été envisagés la mesure et le contrôle dans un sens général. Dans ce chapitre on examinera les différents procédés se rapportant au contrôle de formes particulières ou à des vérifications spécifiques, procédés nécessitant dans certains cas l'emploi de vérificateurs spéciaux que l'on étudiera. Par souci de brièveté, on se limitera aux vérifications :

— du plan,
— des surfaces coniques,
— des filetages,
— des engrenages,
— des états de surfaces,
— des machines-outils (vérification géométrique et pratique).

2. MESURE ET CONTRÔLE DU PLAN

2.1. Comparaison du plan géométrique avec la surface plane mécanique. — Géométriquement, un plan est une surface illimitée telle que si une droite a deux points communs avec cette surface, elle y est contenue toute entière. En métrologie dimensionnelle les différents procédés de vérification du plan sont des applications de telles propriétés géométriques. Ils sont faits en se référant à des éléments géométriques matérialisés (marbre, étalon, arête) ou immatériels (ligne optique, direction prise par une bulle d'air).

Il faut distinguer la *mesure du plan,* qui permet de caractériser les défauts de planéité et qui permet de relever la microtopographie de la surface, et le *contrôle du plan*, qui permet de s'assurer que l'on est dans la tolérance de planéité fixée.

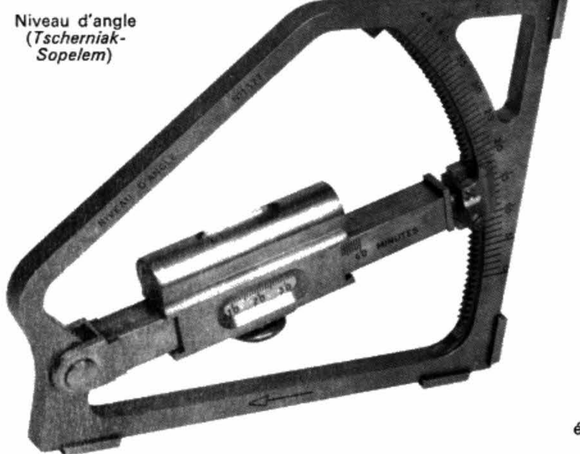
Les procédés de vérification et les vérificateurs sont choisis en fonction des deux critères principaux suivants : l'étendue de la surface plane et la tolérance géométrique.

2.2. Principaux procédés. — Parmi les nombreux procédés de mesure et de contrôle du plan, on distingue :

1° *La vérification sans mesure,* par comparaison avec un élément de référence (règle, marbre étalon) :

2° *La vérification avec mesure :*

a) *avec marbre et comparateur ;*
b) *avec une règle et des cales étalons ;*
c) *avec le niveau ;*
d) *avec une règle optique ;*
e) *avec disque de verre plan à l'interféromètre* (pour mémoire).



Niveau d'angle (*Tscherniak-Sopelem*)

2.3. Contrôle sans mesure

2.3.1. Contrôle à la règle (fig. III-1). — L'image de la droite est matérialisée par l'intersection de deux plans. La ligne droite utilisée pour le contrôle d'une surface plane est une arête de règle. Celle-ci est placée sur la surface à vérifier, successivement suivant trois directions principales et l'on observe le filet de lumière qui filtre entre la surface à vérifier et l'arête de la règle. C'est un procédé de contrôle visuel, facile, rapide mais d'une précision limitée ($\pm$ 0,02 mm).

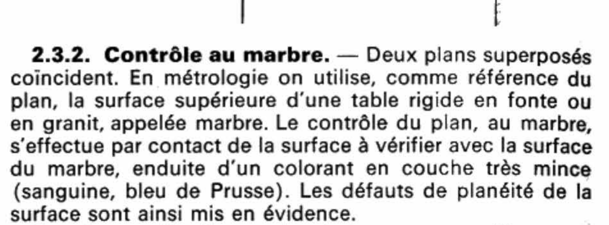


Fig. III-1

Contrôle d'une surface plane à la règle

2.3.2. Contrôle au marbre. — Deux plans superposés coïncident. En métrologie on utilise, comme référence du plan, la surface supérieure d'une table rigide en fonte ou en granit, appelée marbre. Le contrôle du plan, au marbre, s'effectue par contact de la surface à vérifier avec la surface du marbre, enduite d'un colorant en couche très mince (sanguine, bleu de Prusse). Les défauts de planéité de la surface sont ainsi mis en évidence.

Pour le contrôle d'un marbre étalon, on peut utiliser cette méthode, mais pour éviter les défauts complémentaires éventuels de deux surfaces, on utilise un troisième marbre. La planéité des trois marbres est obtenue quand, dans n'importe quel ordre de présentation, la coïncidence des surfaces est réalisée. Cette méthode est minutieuse, longue et coûteuse.

2.4. Contrôle avec mesure

2.4.1. Au comparateur. — Si de plusieurs points d'un plan on abaisse des perpendiculaires à un autre plan parallèle, toutes ces perpendiculaires sont égales. C'est ce que l'on vérifie à l'aide d'un comparateur. La surface d'appui repose sur un marbre en trois points réglables au moyen de cales ou de vérins (trois points suffisent puisqu'ils déterminent un seul plan). À l'aide d'un comparateur on mesure les distances qui séparent les trois points choisis sur la surface du marbre de leurs homologues sur la surface à vérifier (fig. III-5). Lorsque les trois distances sont égales, on contrôle alors si un certain nombre de points de la surface à vérifier sont à la même distance de la surface du marbre.



Niveau électronique (*TESA*)

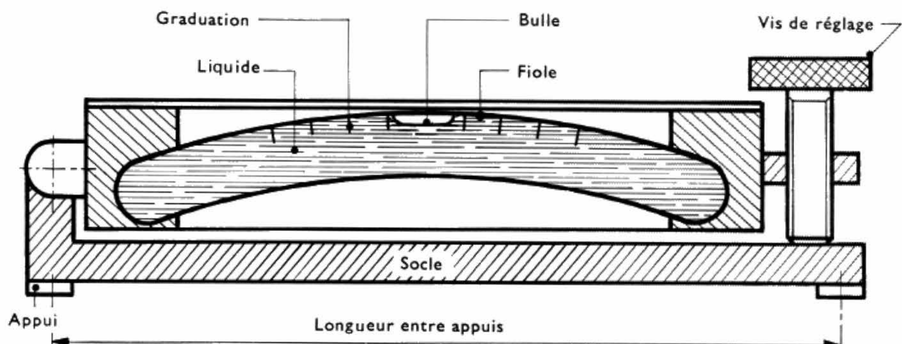


Fig. III-2

Schéma de principe d'un niveau à bulle

2.4.2. Avec une règle et des cales étalons. — La surface à vérifier étant quadrillée (100 mm de côté généralement), on fait reposer une règle étalon sur deux cales étalons de même épaisseur (10 mm, par exemple). La distance entre ces deux cales est approximativement égale aux 5/9 de la longueur de la règle. Suivant chaque ligne de mesure ainsi définie, on vérifie le parallélisme de la surface à contrôler avec la surface de la règle. Après avoir repéré les écarts éventuels pour chaque point considéré, on établit le relevé microtopographique de la surface.

Remarque : La vérification de chaque ligne de mesure avec la règle peut également se faire avec un comparateur monté sur un socle se déplaçant sur la règle étalon.

2.4.3. Avec le niveau à bulle. — Dans un plan, toutes les parallèles ayant la même pente, on peut vérifier cette surface avec le niveau : on mesure les écarts de pentes des parallèles dans deux directions perpendiculaires. Le niveau à bulle (invention du Français Thevenot, 1666) est un appareil de mesure de très grande précision et très sensible. On l'utilise pour mesurer la planéité des surfaces (marbre, banc de machine, rectitude d'une règle, etc.), pour vérifier l'horizontalité des tables de machines-outils ou le parallélisme des glissières (vérification géométrique des machines-outils), pour mesurer directement les faibles pentes. Sur certains appareils, des cales angulaires additionnelles permettent d'étendre le domaine d'utilisation jusqu'à 70°. Ces instruments portent le nom de **clinomètres.**

1° *Description sommaire* (fig. III-2). — Le niveau est constitué essentiellement :

— *d'une fiole en verre de forme torique*, rodée intérieurement et remplie incomplètement d'un liquide très mobile (alcool ou éther sulfurique) de façon à laisser une bulle d'air. Le rayon de courbure extérieure de la fiole des niveaux utilisés en métrologie est compris généralement entre 10 et 50 m, la longueur L entre appuis est de 100 à 200 mm. La graduation millimétrique gravée sur la fiole permet d'évaluer directement des pentes de 0,01 à 0,05 mm par mètre, soit respectivement des valeurs angulaires de 2,4 ou 10 secondes. Différents systèmes d'amplification mécanique ou optique permettent d'augmenter cette précision de lecture ;

— *d'un socle de longueur L* en fonte ou en acier, dont la partie inférieure plane constitue la surface d'appui. Sur certains niveaux de précision, cette surface est caractérisée par trois points d'appuis disposés à une distance L ;

— *d'un système d'étalonnage du niveau.*

2° *Principe* (fig. III-3). — Du fait de la pesanteur, la bulle se place toujours à la verticale du centre O du rayon de courbure R. L'écart entre la position O' (correspondant à la position horizontale d'un niveau étalonné) et la position réelle de la bulle peut être traduite en une différence d'altitude pour deux points situés à une longueur L, distance entre appuis.

Tout niveau de précision comportant un système de réglage de la nivelle par rapport à la surface d'appui, pour la précision des résultats il est indispensable d'étalonner le niveau avant de l'utiliser. L'étalonnage s'effectue toujours par retournement. Cette condition est essentielle pour la mise à l'horizontalité d'un plan mais n'est pas absolue pour un relevé microtopographique.

Certains niveaux dits électroniques comportent un pendule associé à un montage oscillateur et à un appareil de mesure. Le fonctionnement de l'oscillateur dépend de la position d'un barreau de ferrite solidaire du pendule. L'oscillateur fournit un courant dont l'intensité est mesurée au moyen d'un appareil magnétoélectrique. Par simple lecture il est ainsi possible de connaître la planéité d'une surface (fig. III-4).

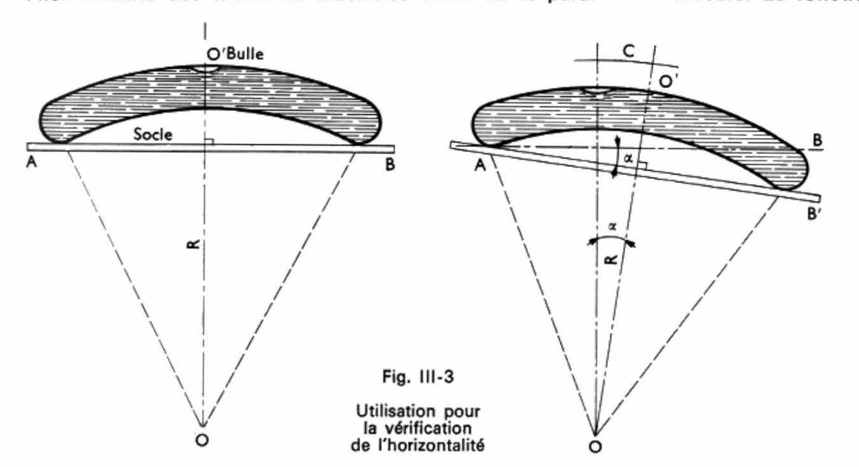


Fig. III-3

Utilisation pour la vérification de l'horizontalité

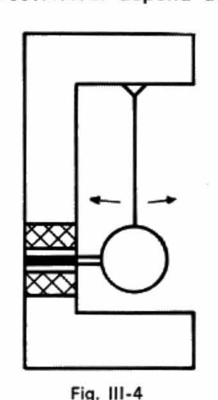
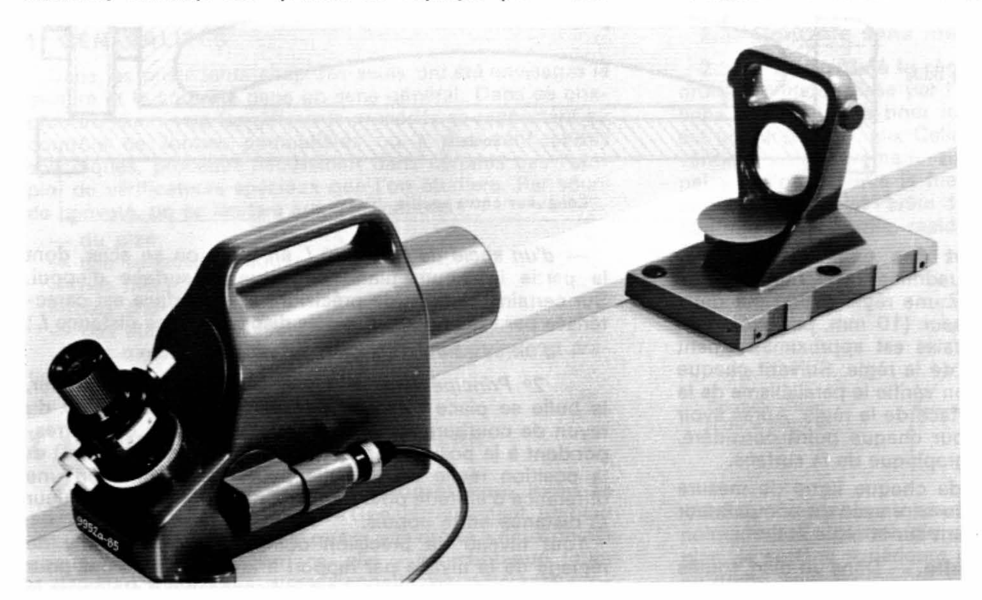


Fig. III-4

Schéma de principe d'un niveau électronique

3° *Contrôle de la rectitude d'une règle* (*planéité*). — La règle est divisée en segments de droite de longueur égale à L (100 mm, par exemple). On commence le relevé par une extrémité et, pour chaque segment, on note l'inclinaison (en micromètres) avec l'horizontale. Pour la précision des résultats on effectue un aller et un retour. À la dernière lecture on constate généralement un écart de plusieurs divisions sur la lecture de départ. Cet écart peut provenir soit d'un dérèglement thermique du niveau, soit de l'usure inégale des touches. On admet que le dérèglement s'est produit uniformément au cours des mesures si bien qu'il s'élimine quand on fait la moyenne des deux lectures aller et retour. La microtopographie d'un plan s'effectue dans le même esprit, la surface étant divisée en carrés.

2.4.4. Avec une règle optique. — La règle optique Huet permet également, à partir d'une lecture directe des dénivellations des lignes de mesure, d'établir le relevé microtopographique de surfaces planes (glissière, banc de machine, marbre). Les qualités de l'optique permettent



Lunette autocollimatrice avec miroir plan (*Leitz*)

une précision de mesure proche de 1 micromètre. La référence de comparaison est l'axe optique de l'appareil.

Description sommaire. — L'appareil repose sur deux cales étalons. L'une d'elles, mobile, permet de régler le parallélisme avec les points extrêmes de la ligne de mesure. Un palpeur solidaire d'un chariot mobile, qui porte le système de visée et la source lumineuse, suit la ligne de mesure. Il peut se déplacer en hauteur suivant les dénivellations de cette ligne. Un déplacement en hauteur du palpeur entraîne le déplacement d'un miroir, ce qui a pour effet de modifier la position du point de réflexion du rayon lumineux sur celui-ci. Dans la lunette de visée l'opérateur observe les images du rayon lumineux, décalées, l'écart étant amplifié par le dispositif. Cette distance est mesurée sur un micromètre ; elle représente la dénivellation subie par le palpeur. On peut également citer la lunette autocollimatrice Leitz qui offre l'avantage d'explorer toute la surface à vérifier.

3. CONTRÔLE D'UNE SURFACE CONIQUE ET D'UNE PENTE

3.1. Généralités. — Concernant la vérification des cônes et la vérification angulaire des surfaces planes (queue d'hironde, cale pentée, etc.) on retiendra les deux méthodes suivantes : méthode avec piges et méthode sinus.

La vérification complète d'un *cône* ou d'un *tronc de cône,* plus courant en mécanique, nécessite les contrôles ci-après :

— *Contrôle géométrique* de la rectitude de la génératrice, de la circularité d'une section normale à l'axe, de la position de la génératrice par rapport à l'axe (contrôle de l'angle au sommet).

— *Contrôle dimensionnel* de l'exactitude des diamètres de base (suivant une direction).

La vérification angulaire de deux *surfaces planes* nécessite les contrôles suivants :

— *Contrôle géométrique* de la planéité des deux surfaces, de la perpendicularité de ces faces avec une face de référence, de la valeur angulaire.

— *Contrôle dimensionnel* de la distance du sommet de l'angle à une face de référence des angles (queue d'hironde) de la distance entre deux sommets opposés (queue d'hironde extérieure ou intérieure) ou de la hauteur minimale ou maximale comprise entre les deux faces opposées (cale pentée).

3.2. Méthode avec piges. — Les piges sont des cylindres rectifiés ou rodés, en acier généralement traité, dont le diamètre mesuré avec précision est connu. Pour la vérification angulaire, les piges sont souvent utilisées en combinaison avec des cales rectifiées ou des cales étalons.

Applications : Vérification d'un tampon (fig. III-5) et d'un calibre d'angle (fig. III-6). On rappelle que les cotes sont exprimées en millimètres.

a) *Tampon.* — Matériel proposé : un marbre ou un support de pièce spécial, deux piges de diamètre 10, une bague rectifiée d'épaisseur 24, par exemple, ou deux cales étalons de même épaisseur, un micromètre.

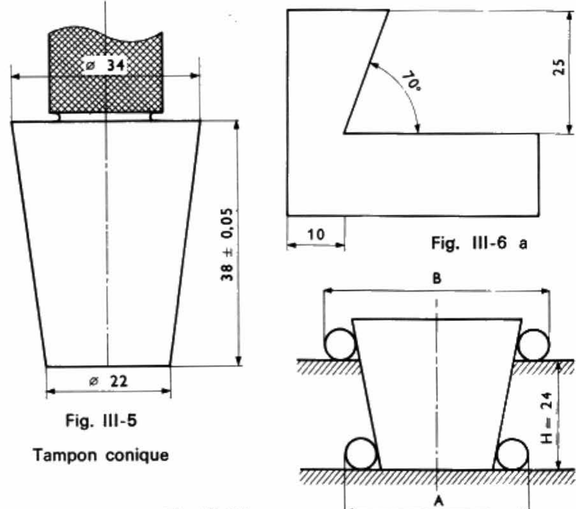


Fig. III-5 Tampon conique

Fig. III-6 a

Fig. III-6 b

Les calculs faits à partir du schéma d'installation ci-dessous permettent de déterminer $A = 43{,}70$, $B = 51{,}27$.

— Disposition des résultats :

Cotes	Cotes théoriques	Cotes réalisées	Différence
B	51,27	51,21 →	0,06
A	43,70	43,64 →	0,06
Différence	7,57	7,57	0

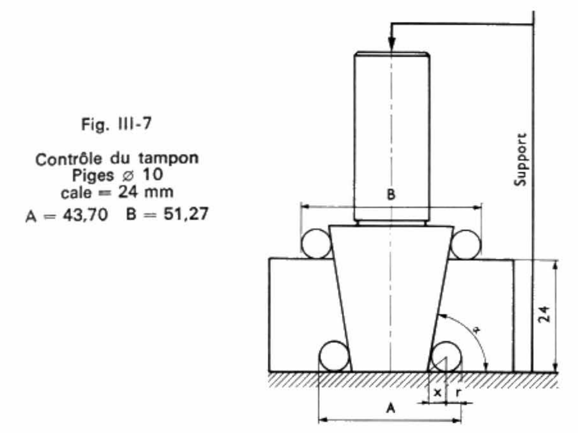


Fig. III-7

Contrôle du tampon
Piges ⌀ 10
cale = 24 mm
A = 43,70 B = 51,27

— Interprétation des résultats : la valeur de l'angle est respectée, mais les cotes des diamètres de base sont faibles.

b) *Calibre d'angle*. — Matériel proposé : un marbre, un vé, une pige de diamètre 8 et une pige de diamètre 20, un micromètre.

Le schéma d'installation ci-dessous permet de déterminer $A = 15{,}71$ et $B = 34{,}28$.



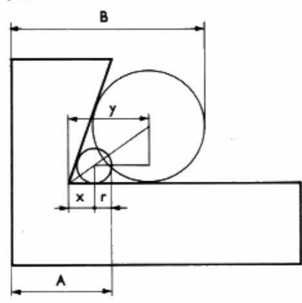


Fig. III-8

Contrôle du calibre
$A = 10 + x + r$
$B = 10 + y + r$

— Disposition des résultats :

Cotes	Cotes théoriques	Cotes réalisées	Différence
B	34,28	34,27 →	0,01
A	15,71	15,33 →	0,38
Différence	18,57	18,94 →	+ 0,37

— Interprétation des résultats : la valeur de l'angle (70°) n'est pas respectée.

Remarque : Dans le cas ou la valeur angulaire est vérifiée par un autre moyen (calibre, rapporteur), le diamètre des piges utilisées pour la vérification dimensionnelle doit être choisi de manière à ce que la génératrice soit approximativement tangente au minimum à la mi-hauteur du flanc.

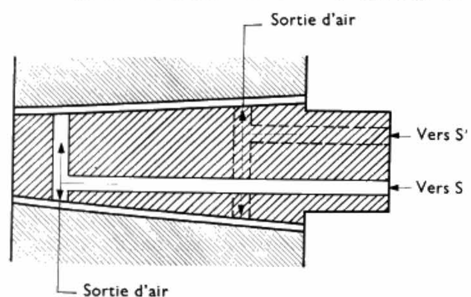


Fig. III-9 — Mesure d'un cône. Elle est indépendante de l'enfoncement du tampon et d'un défaut d'ovalisation à condition qu'il ne soit pas en spirale

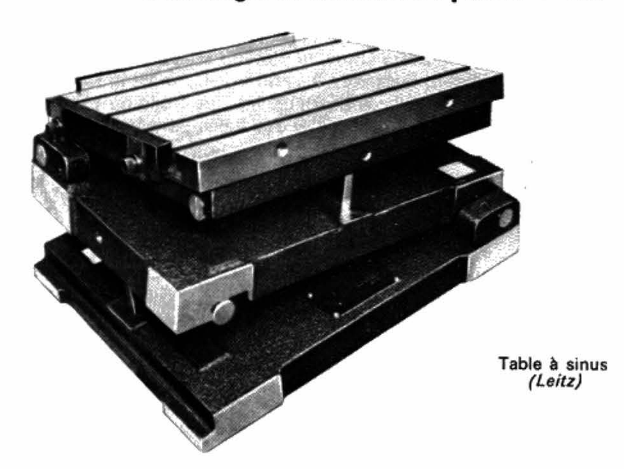


Table à sinus
(Leitz)

3.3. Méthode sinus. — La méthode sinus, comme son nom l'indique, est une application du sinus d'un angle. Pour mémoire on rappelle les définitions géométriques suivantes :

— un cercle trigonométrique (fig. III-10) est un cercle orienté dont le rayon est égal à l'unité ;

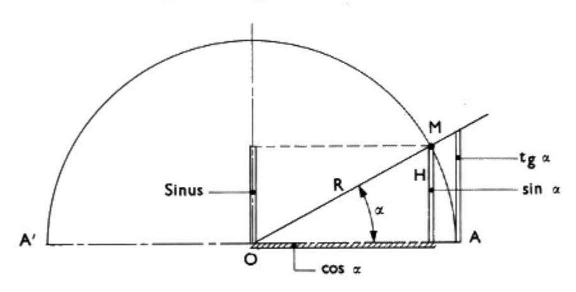


Fig. III-10 — Cercle trigonométrique
R, le rayon du cercle est égal à l'unité de longueur choisie pour les distances

— la longueur d'un arc de cercle trigonométrique s'exprime par le même nombre que l'angle au centre correspondant ;

— le sinus d'un angle est le rapport de la longueur H de la portion de perpendiculaire abaissée de l'extrémité M d'un arc AM sur le diamètre AA' et du rayon R du cercle :

$$\sin \alpha = \frac{H}{R}$$

De cette relation on tire l'égalité suivante : $H = R \sin \alpha$.

Tous les appareils utilisables pour la méthode sinus (fig. III-11) comportent deux cylindres rectifiés, en acier traité, d'entraxe 100 mm (± 1 μm) ou d'un multiple de 100, pour la commodité des calculs ; ils matérialisent le rayon R. La hauteur H varie en fonction de l'angle α à vérifier donc de

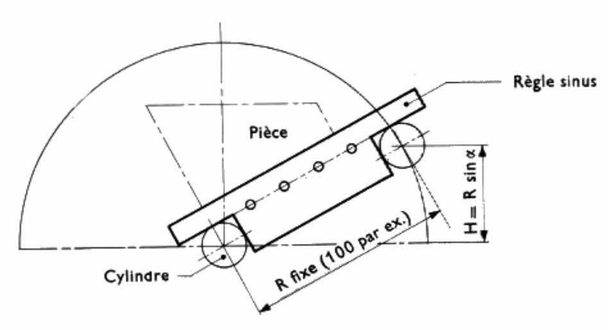


Fig. III-11 — Principe sinus

son sinus. En dehors de la mesure précise de l'entraxe et de l'égalité des diamètres des deux cylindres, la précision de mesure de ces appareils est fonction du parallélisme de la surface d'appui de la table et de la ligne d'axe passant par le centre des cylindres.

On trouve de nombreux appareils utilisables pour la méthode sinus : la barre sinus, le plateau sinus à simple ou à double inclinaison, l'appareil à vérifier les cônes, le rapporteur sinus, l'étau sinus, le diviseur, les appareils de réglage pour la rectification des cônes et des cales pentées, etc.

Application. — Vérification par la méthode sinus de la valeur de l'angle de la cale pentée représentée par la figure III-12.

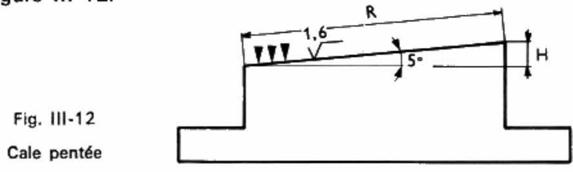


Fig. III-12
Cale pentée

Matériel proposé : marbre, barre sinus, boîtes de cales étalons, comparateur. Le schéma d'installation (fig. III-13) nous permet de calculer H (épaisseur théorique de la cale)

$$H = R \sin 5° = 0{,}0872$$
$$H = 8{,}72$$

Fig. III-13 — Contrôle de la pente, schéma d'installation

On placera sous le cylindre A une cale (ou un empilage) de 8,72 et on vérifiera le parallélisme de la face F avec la surface du marbre. S'il y a une erreur de parallélisme, on modifie l'épaisseur de la cale en conséquence, de manière à obtenir le parallélisme des deux faces considérées. La différence entre l'épaisseur H et l'épaisseur de la cale permet de calculer l'erreur angulaire.

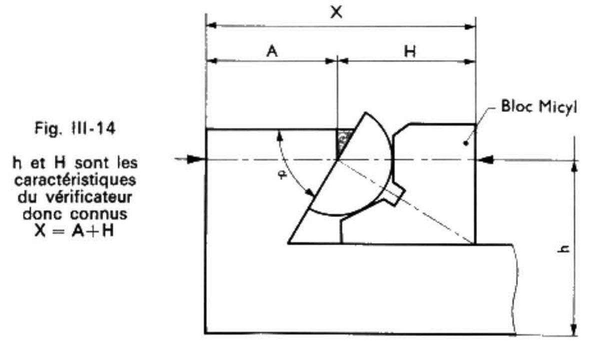


Fig. III-14
h et H sont les caractéristiques du vérificateur donc connus
X = A+H

Vérification d'une queue d'aronde avec un bloc Micyl

Pour mémoire on peut également citer les blocs Micy L.C.A. (fig. III-14) qui permettent rapidement et efficacement, en évitant les calculs qu'exigent la vérification avec piges, de mesurer des troncs de cônes ou les pièces à génératrices courbes convexes.

4. VÉRIFICATION DES FILETAGES

Dans ce paragraphe, on étudiera les principaux moyens de vérification des pièces filetées extérieures (vis) ou intérieures (écrous). La figure III-15 (profil ISO) en rappelle les caractéristiques. Les normes EO 3-051 à 03-55 donnent les tolérances de fabrication des filetages pour les diamètres de 1 à 300 mm, suivant le principe de l'interchangeabilité des pièces lisses. Les normes EO 3-151 à 03-154 donnent les tolérances de vérification des filetages par calibres à limites.

Cinq critères sont à considérer pour la vérification complète d'un filetage :

— le diamètre extérieur ou diamètre nominal (D) pour la vis ou diamètre intérieur pour l'écrou ($D1$) ;
— le profil générateur ;
— le pas (exactitude et constance) ;
— le diamètre intérieur ou diamètre du noyau (vis) ou le diamètre à fond de filet (écrou) ;
— le diamètre effectif ou diamètre à flanc $D2$.

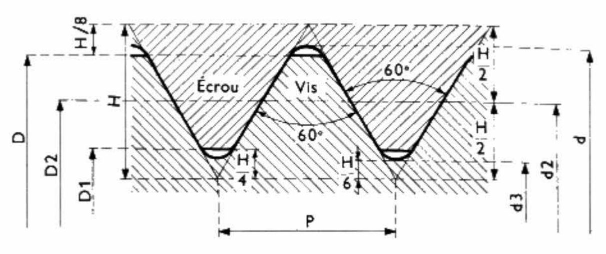


Fig. III-15 — Profil ISO

Diamètre nominal D — d

$$\text{Diamètre sur flancs } D2 = d2 = d - \frac{3H}{4}$$
$$= d - 0{,}6495\ p$$

Une erreur de profil ou une erreur de pas (ou les deux à la fois) influence la vérification du diamètre effectif et c'est pourquoi, dans la vérification des filetages précis, il y a lieu de vérifier d'abord le profil et le pas. La vérification des filetages peut être divisée en deux catégories : les vérifications sans mesure suivant le principe de l'interchangeabilité et les vérifications avec mesure, le choix déterminant est, bien entendu, basé sur la précision et le nombre de pièces.

4.1. Vérification sans mesure. — La vérification d'un ensemble fileté, suivant le principe de l'interchangeabilité doit permettre de s'assurer que les jeux, minimal et maximal, ne dépassent pas les limites permises ; c'est pourquoi la vérification complète comprend :

— *pour la vis :* un calibre mâchoire « entre », un calibre mâchoire « n'entre pas », une bague filetée « entre », une bague filetée « n'entre pas ». Les bagues filetées peuvent être remplacées par des calibres à molettes ;
— *pour l'écrou :* un tampon lisse « entre », un tampon lisse « n'entre pas », un tampon fileté « entre », un tampon fileté « n'entre pas ».

Les calibres de filetage font l'objet des mêmes contrôles périodiques que les calibres pour pièces lisses. Les bagues sont vérifiées à l'aide de tampons filetés rapporteurs : « entre », « n'entre pas » et tampons témoins d'usure. Pour le contrôle du profil et du pas d'un tampon fileté, on peut utiliser un microscope de mesure, le diamètre de flanc étant vérifié avec des piges ou plus précisément avec une machine à mesurer.

4.2. Vérification avec mesure. — La mesure des éléments du filetage permet de déterminer si la pièce à contrôler est dans les tolérances.

Le contrôle du diamètre nominal D de la vis ou le diamètre intérieur de l'écrou $D1$ peut être effectué avec un micromètre, un calibre à coulisse, un comparateur étalonné ou un mesureur.

Le contrôle du profil et du pas peut être réalisé avec un projecteur de profil ou un microscope.

Le diamètre effectif ou diamètre de flanc peut être effectué avec un micromètre à touches spéciales pour les vis et les écrous, au moyen de trois piges et d'un micromètre pour la vis et sur une machine à mesurer.

4.2.1. Mesure du diamètre de flanc

1° *Avec un micromètre à filet* (fig. III-16). — L'extrémité de la vis micrométrique est munie d'une touche conique à l'angle de profil avec troncature suffisante pour ne pas toucher au fond du filet. La touche apposée est un vé à 60°. Un calibre étalon permet de régler le micromètre. On établit la formule : $D2 = D - 0{,}6459\ p$.

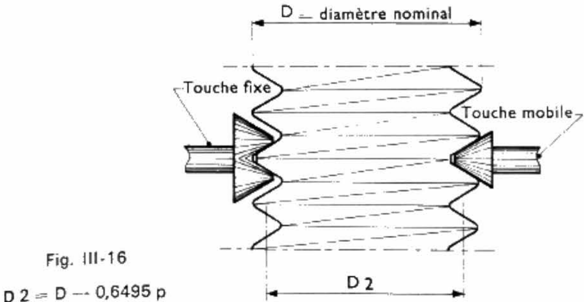


Fig. III-16

D 2 = D — 0,6495 p

Vérification du diamètre moyen avec un micromètre à filet

2° *Avec trois piges rectifiées de même diamètre* (fig. III-17 et III-18).

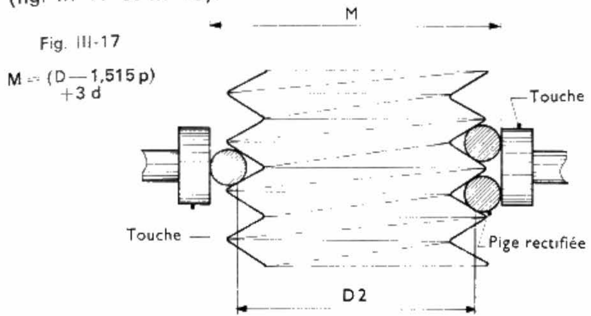


Fig. III-17

M = (D — 1,515 p) + 3 d

Vérification du diamètre moyen D 2 avec trois piges rectifiées de même diamètre (p : pas de la vis ; d : diamètre de la cheville)

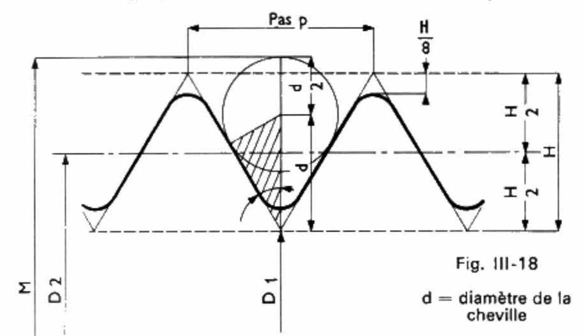


Fig. III-18

d = diamètre de la cheville

$$M = D1 + 3d$$

et: $D = D1 + (2H - \frac{H}{4}) = D1 + \frac{7}{4}H$

Or: $H = 0{,}866$ p.

On remplace $D1$ par sa valeur :

$$D1 = D - 1{,}515\,p;$$

$$M = (D - 1{,}515\,p) + 3\,d$$

Remarque : Dans le commerce on trouve des jeux de trois piges de même diamètre. Celui-ci est calculé pour que la pige soit tangente aux deux flancs et à la base théorique du triangle générateur non tronqué. La mesure M est donnée par la formule : $M = D + 0{,}2165\,p$.

4.2.2. Application. — Calcul de la cote M pour une vis ISO ⌀ 14 (pas 2).

1er cas : On ne possède pas un jeu de piges pour pas métrique. On choisit trois piges ⌀ 2, par exemple :

$$M = 14 - (1{,}515 \times 2) + 6 = 16{,}97 \text{ mm}$$

2e cas : On possède un jeu de trois piges pour pas métrique :

Pour : $p = 2$; $d = 1{,}1547$

$$M = 14 + (0{,}2165 \times 2) = 14{,}433 \text{ mm}$$

5. VÉRIFICATION DES ENGRENAGES

5.1. Généralités. — Un engrenage est un système de deux ou plusieurs roues dentées (fig. III-19). Il permet de transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre ; cela dans un rapport de vitesses déterminé. Selon la position géométrique des axes des arbres d'entraînement (parallèles, concourants, situés dans des plans différents) les dentures correspondantes ont des formes différentes (engrenages cylindriques, coniques, hélicoïdaux, roue dentée et crémaillère, etc.). Les engrenages sont des éléments de transmission très importants dans la construction mécanique. Ils conditionnent en particulier le bon fonctionnement et la précision des machines-outils. C'est pourquoi, un contrôle sérieux et minutieux des engrenages s'impose. Les engrenages parallèles à denture en développante de cercle (V. t. 3, Dessin technique, chap. 3) étant très utilisés en construction mécanique, on se limitera à l'étude des différents moyens de contrôle de cette catégorie d'engrenages. S'inspirant du système ISO des tolérances des pièces lisses et des pièces filetées, le système ISO de précision des engrenages, qui fait l'objet de la norme E 23-006 (juillet 1967) indique, d'une part, l'ensemble des contrôles à prévoir tant sur les roues isolées que sur les engrenages montés et, d'autre part, la valeur des tolérances correspondantes.

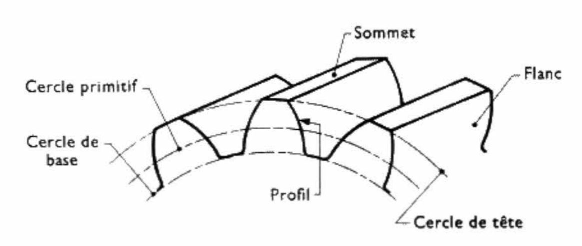


Fig. III-19

Éléments d'une roue dentée à denture droite

Ce système couvre un domaine très étendu depuis les dentures de précision exceptionnelle (surfaces rodées) jusqu'à celles de qualités très grossières (obtenues en fonderie).

Il comporte *douze classes de précision* numérotées de 1 à 12 dans l'ordre *croissant des tolérances.*

La vérification complète d'un engrenage comprend :

1° *La vérification de chacun des éléments constituant l'engrenage.*

2° *La vérification de l'engrenage monté.*

5.2. Contrôle de la roue dentée. — Deux contrôles sont nécessaires : le contrôle du corps de la roue (phase de tournage) et le contrôle de la denture (phase de taillage).

5.2.1. Contrôle du corps (fig. III-20). — On vérifie avant taillage :

— l'alésage ou l'arbre de référence au point de vue forme et dimension (arbre sur lequel est usiné la roue dentée) ;

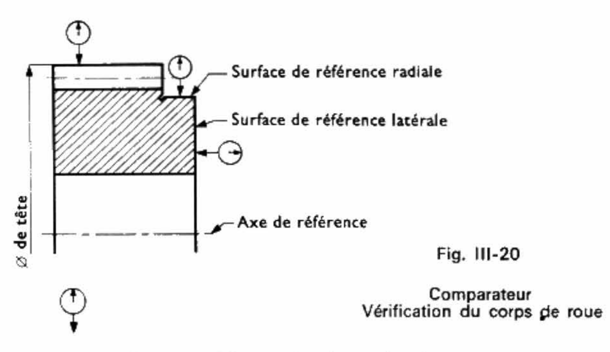


Fig. III-20

Comparateur

Vérification du corps de roue

— la surface extérieure (surface de tête de la denture : faux rond par rapport à l'axe de l'élément de référence, diamètre) ;

— la surface de référence latérale : voile par rapport à l'axe de référence de l'élément ;

— éventuellement la surface de référence radiale.

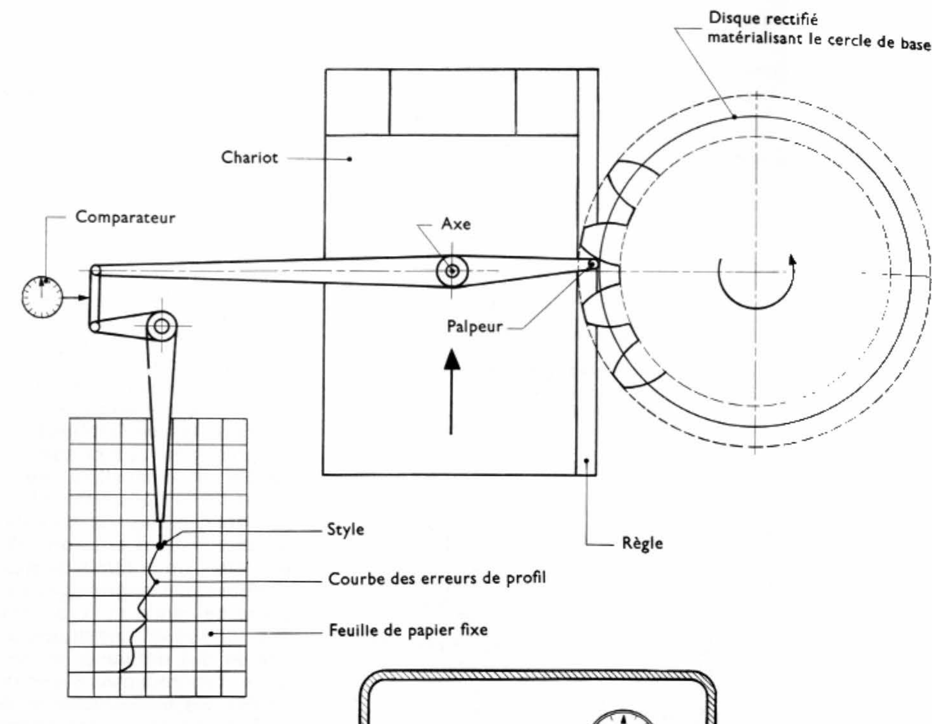


Fig. III-21

Schéma de principe d'un appareil à contrôler les profils

5.2.2. Vérification de la denture. — Elle comprend les contrôles du profil, de la division, de l'excentricité, de la distorsion et de l'état de surface. Ces contrôles concernent toutes les grandeurs qui caractérisent la denture. La mesure de certaines autres grandeurs ainsi que la mesure de l'ensemble sont imposées par la qualité de l'engrenage à vérifier. Les roues d'engrenages sont classées en cinq catégories :

a) Très bonne rectification, rodage.
b) Rectification de précision.
c) Taillage de bonne qualité (par engrènement).
d) Taillage de qualité moyenne.
e) Taillage grossier (fonderie).

5.2.3. Profil. — Le contrôle du profil peut se faire au projecteur de profil par comparaison avec une épure tracée à l'échelle de grossissement de l'appareil ou avec un appareil spécial à contrôler les profils. (fig. III-21). L'appareil est basé sur le principe géométrique de la développante de cercle. La roue à contrôler est montée sur l'axe d'un disque matérialisant son cercle de base. Une règle, solidaire d'un chariot mobile, tangente à ce disque, matérialise la ligne. Dans son déplacement le chariot entraîne la rotation du disque selon le principe de la développante, roulement sans glissement. L'extrémité du palpeur articulé décrit la développante théorique. Toute erreur de profil est détectée par ce palpeur et enregistrée directement au comparateur ou graphiquement par le style sur une feuille de papier.

5.2.4. Contrôle de la division

1° *À l'aide d'un appareil à denture* (fig. III-22). — L'appareil comporte deux butées réglables que l'on positionne en appui sur la surface extérieure de la roue à vérifier (cercle de tête). Les touches, l'une fixe et réglable et l'autre mobile, sont en contact avec deux points homologues de deux dents quelconques consécutives. Ces deux points peuvent être situés sur le cercle primitif ou sur le cercle de base. La distance *M* d'étalonnage de l'appareil peut donc représenter, soit le pas circonférentiel, soit le pas normal. Les dents sont prises successivement entre la touche de référence et la touche réglable. L'extrémité de celle-ci transmet au comparateur les écarts de division relatifs à la corde du pas circonférentiel ou du pas normal.

2° *À l'aide d'un micromètre à mesurer l'écartement des dents* (fig. III-23).

Pour mémoire : $E = M \cos \alpha_0 \, [(Z' - 0{,}5)\pi + Z \operatorname{inv} \alpha_0]$

La mesure de l'épaisseur des dents peut être faite à l'aide d'un calibre à module ou pied module (voir figure ci-contre).

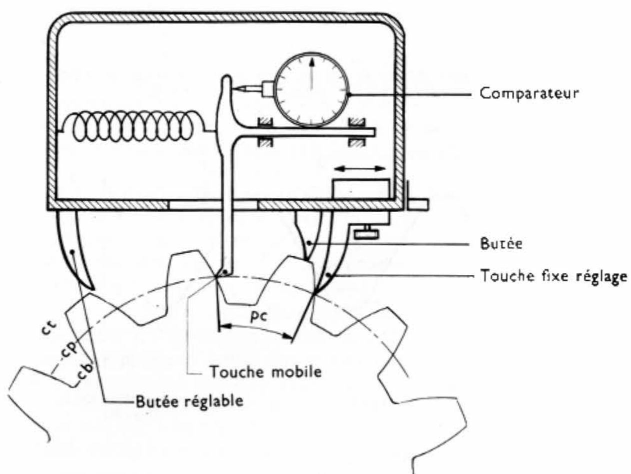


Fig. III-22 — Mesure de la division à l'aide d'un micromètre à denture
ct : cercle de tête. — cp : cercle primitif. — cb : cercle de base

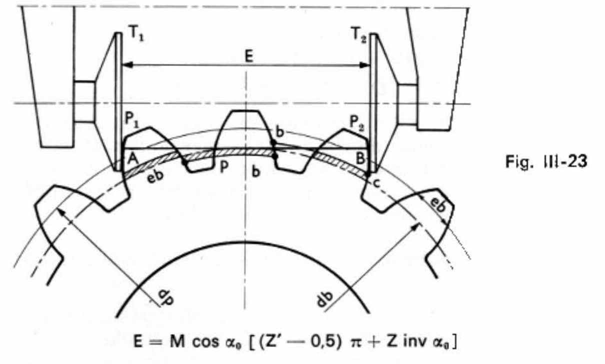
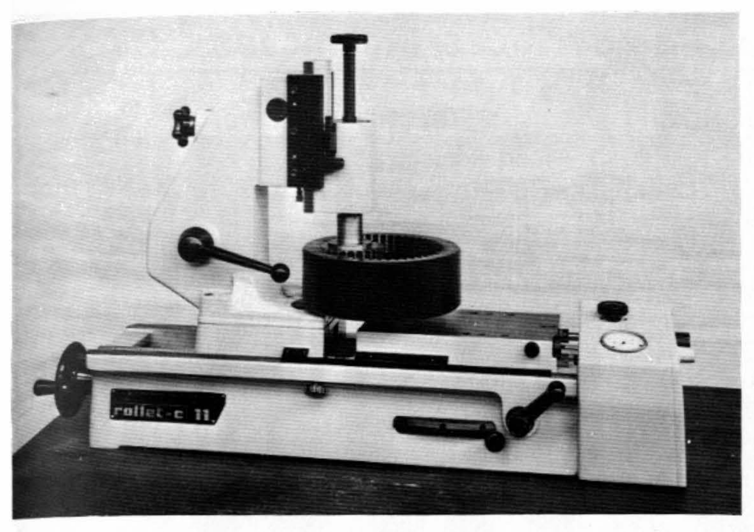


Fig. III-23

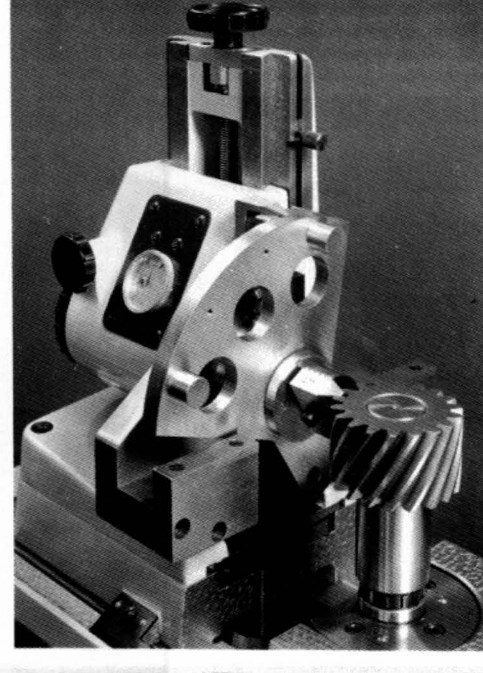
$$E = M \cos \alpha_0 \, [(Z' - 0{,}5)\pi + Z \operatorname{inv} \alpha_0]$$

On désigne par :

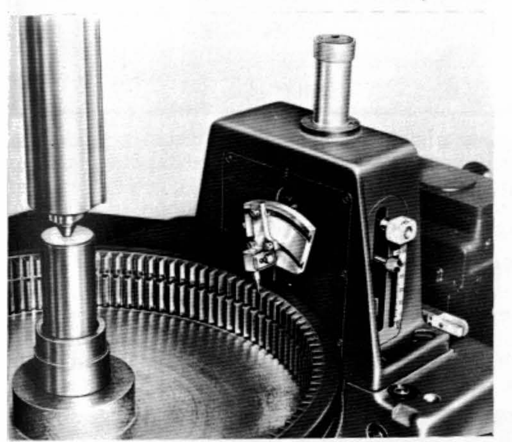
- Z : nombre de dents de la pièce
- M : module
- α_0 : angle de pression sur le cercle primitif
- db : diamètre de base
- p : pas normal
- eb : épaisseur de la dent curviligne de base
- inv : fonction de la développante = tg — (Involute fonction de la développante)
- E : écartement
- Z' : nombre de dents entre les plateaux du micromètre
- e : épaisseur de la dent sur le cercle primitif



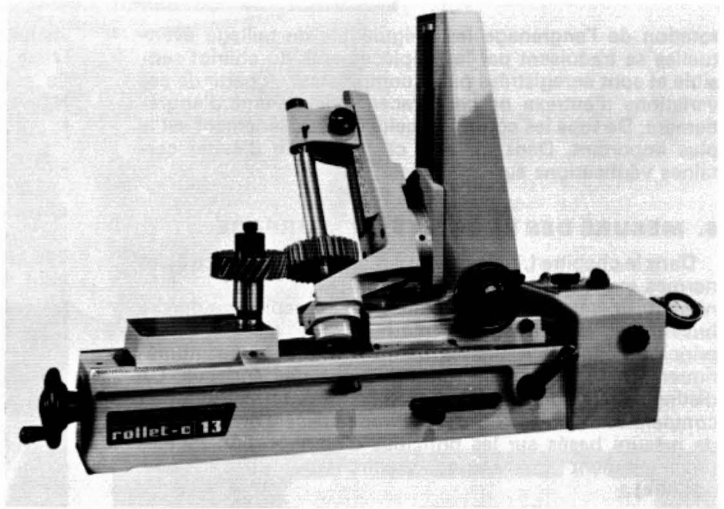
Contrôle d'une denture hélicoïdale à l'aide d'un pignon étalon à denture droite (*Rollet*)



Vérification d'une roue cylindrique à denture hélicoïdale (*Rollet*)



Vérification d'une roue à denture intérieure (*Carl Zeiss, Jena*)

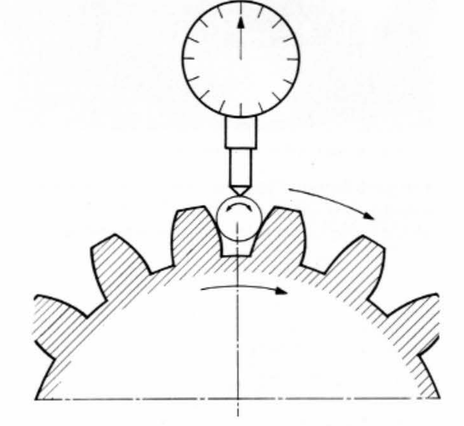


Contrôleur d'engrenages (*Rollet*)

5.2.5. Contrôle de l'excentricité. — L'excentricité est la distance entre l'axe de rotation de l'axe de la roue et l'axe de son cercle primitif.

1° *Pour mémoire.* — Méthode du galet (fig. III-24). La méthode est peu précise.

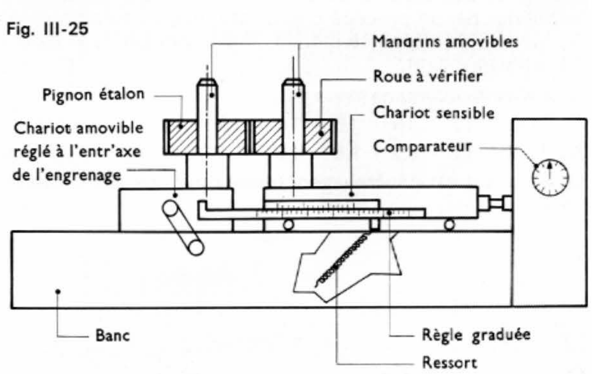
Fig. III-24
Pour la mesure rechercher le point de rebroussement



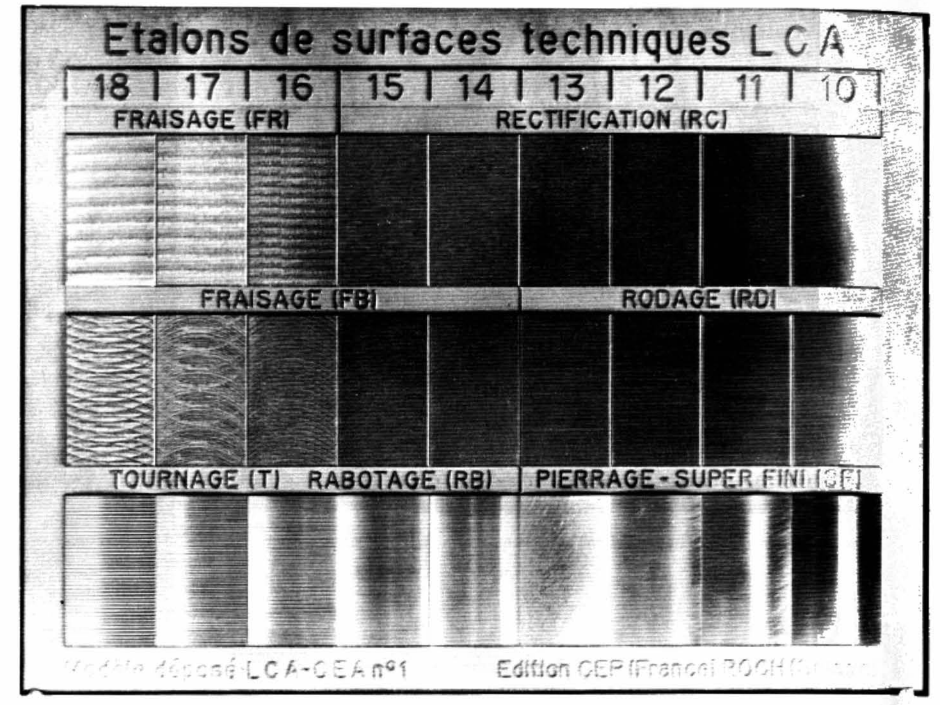
Contrôle de l'excentricité par la méthode du galet

2° *À l'aide de l'appareil à entraxer* (fig. III-25). — L'appareil comporte deux chariots l'un fixe et réglable, l'autre mobile ou chariot sensible. Une règle graduée et un vernier permettent de contrôler l'entraxe de l'engrenage. La roue à contrôler est montée sur le chariot sensible et engrène avec une roue étalon, montée sur le chariot fixe. Un ressort solidaire du chariot mobile assure une pression constante de la roue à vérifier sur la roue étalon. Pendant la

Fig. III-25



Contrôle de l'excentricité avec le contrôleur d'engrenage



Plaquette de comparaison de rugosité, principe viso-tactile Rugotest (*Forges de Vulcain*)

rotation de l'engrenage les irrégularités de taillage éventuelles se traduisent par les déplacements du chariot sensible et sont enregistrées par le comparateur. À partir de ces variations d'entraxe on peut tracer le diagramme d'engrènement. De tous les contrôles, celui de l'engrènement est le plus important. Dans certains cas il permet d'éviter certaines vérifications sus-indiquées.

6. MESURE DES RUGOSITÉS DE SURFACE

Dans le chapitre I, paragraphe 4.4, on a fait référence à des normes expérimentales E 05 — O 15 — 16 — 17 — définissant les états de surface. Dans ce paragraphe, on décrira brièvement les principales méthodes de mesure et les principaux appareils utilisés permettant d'exprimer numériquement la qualité microgéométrique des surfaces. On distinguera les deux méthodes suivantes : la méthode par comparaison viso-tactile et la méthode utilisant des appareils de mesure basés sur les principes d'amplification étudiés précédemment (mécanique, électronique, pneumatique, optique).

6.1. Comparaison viso-tactile. — On utilise des étalons de surface, appelés Rugotest. Ces étalons à surfaces planes, convexes ou concaves, à différentes rugosités, correspondent aux procédés d'usinage usuels : rabotage, tournage, fraisage, rectification, rodage, pierrage, électro-érosion. Le critère de profil caractérisant les échantillons est le plus souvent le critère statistique *Ra* qui exprime l'écart moyen arithmétique du profil par rapport à la ligne moyenne. Les étalons de surface L.C.A. sont réalisés en nickel dur par un procédé d'électroformage. Ils comportent un numéro de référence individuel qui caractérise le critère *Ra* correspondant :

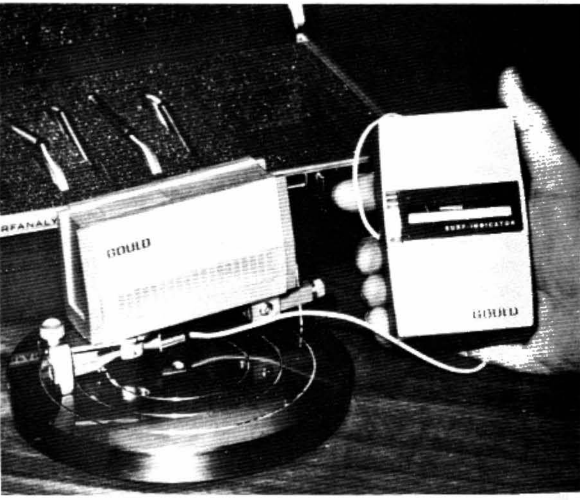
Numéros de référence :

	18	17	16	15	14	13	12	11	10
Ra	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05 μm.

Le Rugotest est généralement utilisé pour une comparaison visuelle avec la surface à vérifier. Un dispositif optique à faible grossissement ($\leqslant 25$) peut également être employé. La comparaison tactile, à l'ongle, est également admise. Néanmoins cette méthode reste une méthode d'atelier où l'appréciation de l'opérateur reste prépondérante.

6.2. Emploi d'un appareil de mesure

6.2.1. Appareils de mesure à palpeur à aiguille en diamant ou en saphir. — La mesure des rugosités à l'aide de ces appareils consiste à évaluer les profondeurs des aspérités de faibles amplitudes longitudinales en éliminant les défauts de forme. Pour cela les déplacements



Appareil portatif à mesurer la rugosité (*Gould-Forges de Vulcain*)

enregistrés sur l'appareil sont les déplacements relatifs d'un palpeur par rapport à un patin (fig. III-26). Comme le patin décrit la ligne enveloppe correspondant au défaut de forme,

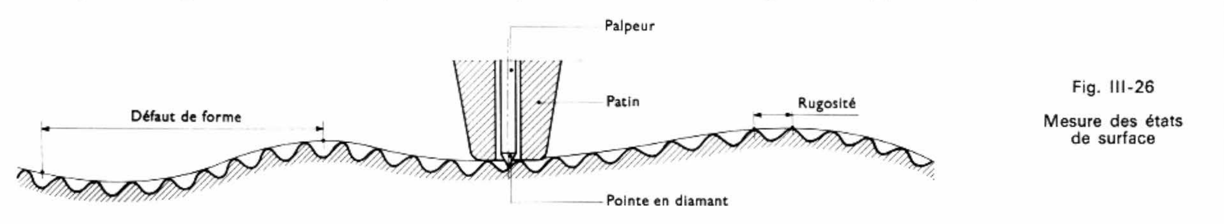
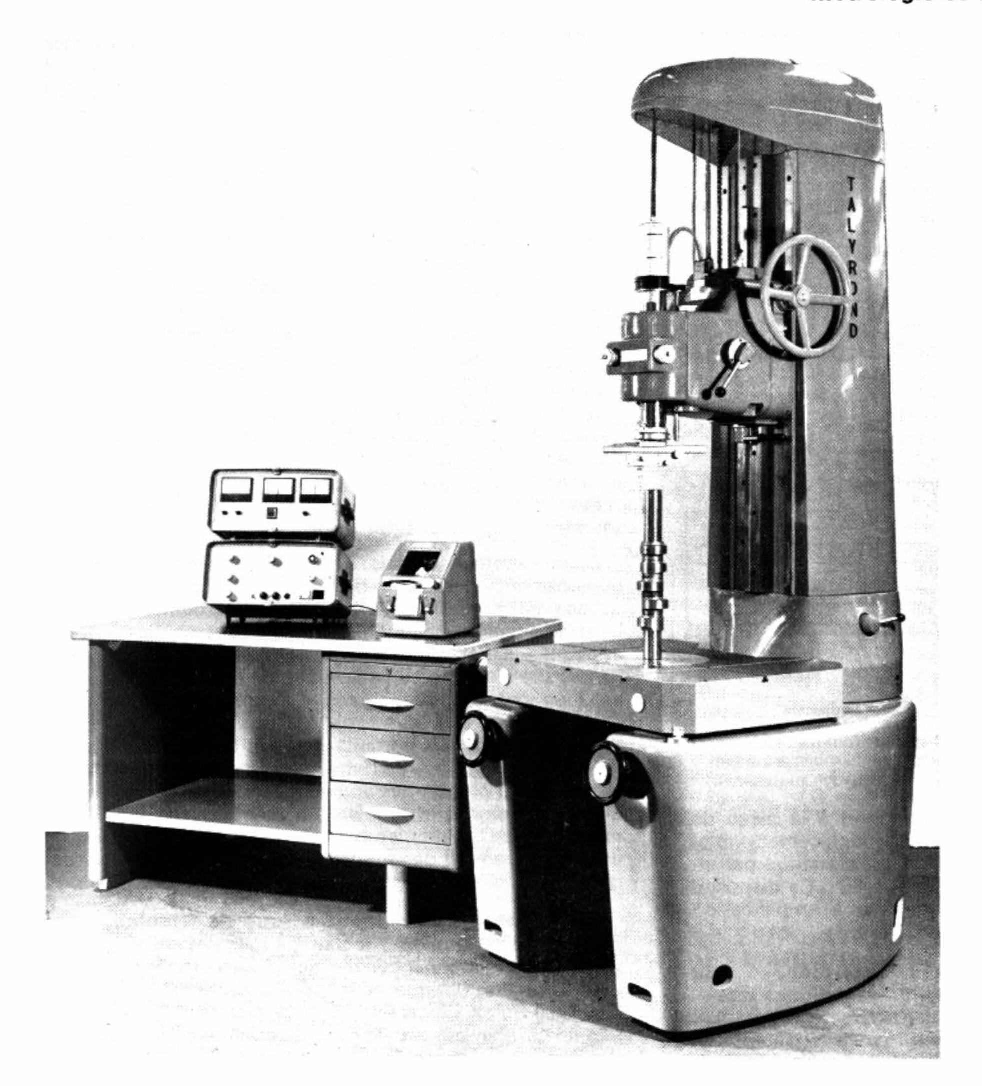


Fig. III-26

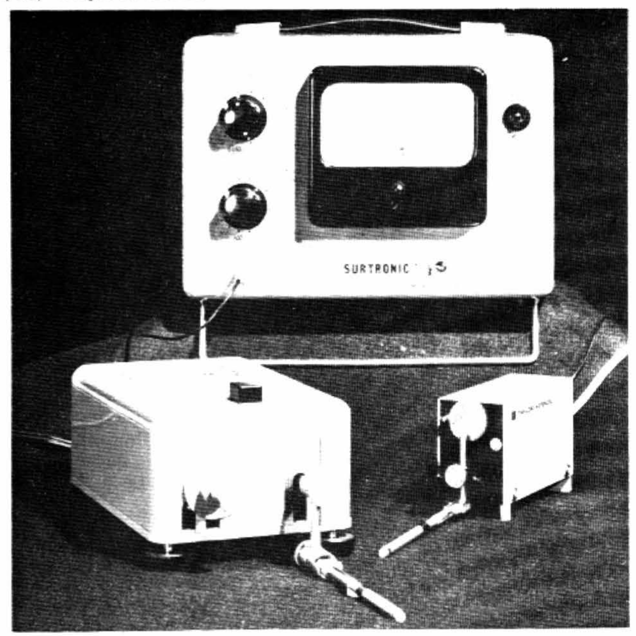
Mesure des états de surface



Appareil pour mesurer
la rugosité
(*Rank*)



Appareil à mesurer
la circularité
(*Bray - Forges de Vulcain*)



Appareil portatif à mesurer les états de surface avec deux pick-up équipés de stylet en diamant (*Rank*)

les valeurs exprimées par l'appareil intéressent uniquement la rugosité. Il est à noter que ces profondeurs sont définies pour une forme et une dimension du patin (plan, courbe, rayon de courbure) ainsi que pour un palpeur de forme et d'angle d'ouverture déterminés. En conséquence, avec la mesure d'un état de surface, il convient de préciser le type d'appareil utilisé.

6.2.2. Appareils à amplification mécanique. Profilomètre Johansson (fig. III-27). — Ce petit appareil de mesure, simple et pratique, permet d'établir sur une feuille millimétrée le tableau des valeurs des rugosités enregistrées

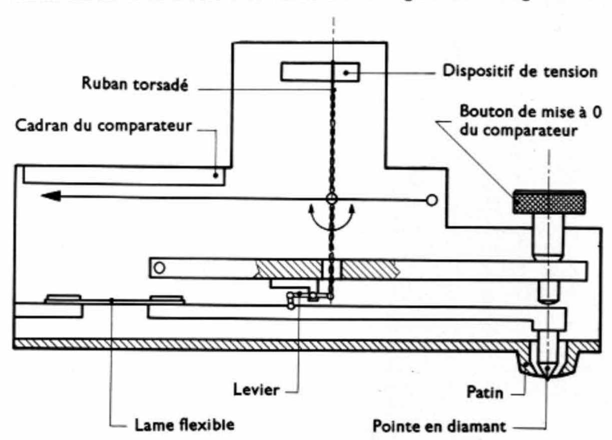


Fig. III-27 — Principe du profilomètre Johansson. Tout déplacement du palpeur entraîne une flexion de la lame. La torsion du ruban est modifiée et cela provoque la rotation de l'aiguille

lorsque le palpeur est déplacé par rapport à la pièce de centième en centième de millimètre (déplacement total 0,25 mm). Le dispositif d'exploration est constitué par un cône en diamant dont l'ouverture est de 60°. Ce dispositif d'exploration est relié à un comparateur à amplification mécanique à ruban torsadé (V. chap. 2, § 4.2.1).

6.2.3. Appareils électroniques à capteur. — Pour obtenir des courbes de profil dans des conditions industrielles on a réalisé des appareils enregistrant les déplacements d'un palpeur après amplification. Ils sont appelés commercialement *profilographe, rugosimètre, analyseur de surface.*

Dans ces appareils, au cours de l'exploration, on fait correspondre une grandeur électrique aux déplacements verticaux du palpeur. À partir du signal électrique ainsi obtenu et amplifié, il est possible soit de visualiser le profil en l'enregistrant, soit d'évaluer directement le profil mesuré d'après un ou plusieurs critères de profil. Parmi ces derniers appareils, on peut classer les appareils américains Brusch et anglais Taylor-Hobson.

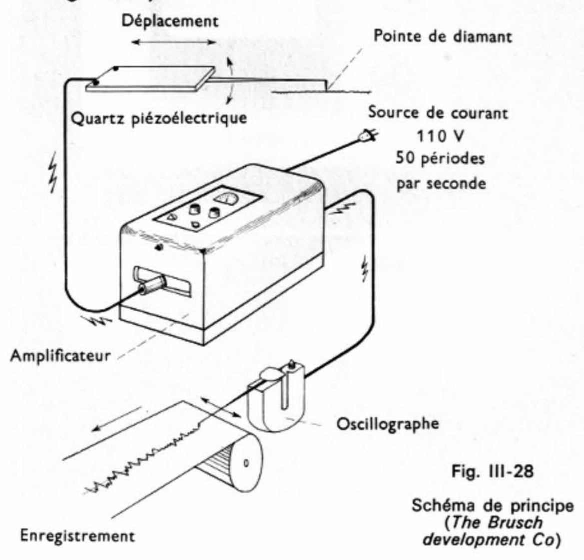


Fig. III-28

Schéma de principe (*The Brusch development Co*)

Dans l'appareil Brusch (fig. III-28) la pointe de diamant conique, dont le rayon de pointe peut être de 0,012 à 0,0025 µm suivant la rugosité des surfaces à mesurer, agit sur une lamelle de quartz piézoélectrique. Les flexions de la lamelle de quartz, dues aux déplacements verticaux de l'aiguille, permettent d'engendrer une d.d.p. fonction de ces déplacements et d'actionner, après amplification, un oscillographe à style. On obtient ainsi un enregistrement graphique. La mesure des rugosités définissant la qualité de surface est généralement exécutée à partir d'une ligne médiane partageant le profil enregistré en surfaces équivalentes. Avec cet appareil la rugosité est définie quantitativement par l'écart moyen quadratique par rapport à la ligne médiane (racine de la moyenne de la surface).

Exemples: Rugosité moyenne R.M.S. (de Rootmean square) de l'acier usiné:

— Après tournage fin: 1 à 1,5 µm.
— Après rectification moyenne: 0,63 à 0,75 µm.
— Après rodage: 0,7 à 0,15 µm.
— Après superfinition: 0,015 à 0,03 µm.

Ces résultats sont souvent exprimés en micropouces (1 micropouce = 0,0254 µm).

Dans l'appareil anglais *Talysurf* de Taylor-Hobson, les déplacements verticaux de la pointe en diamant sont utilisés pour modifier la capacité d'un condensateur et c'est la tension engendrée qui, après amplification, est appliquée à l'entrée d'un oscillographe. La rugosité est définie par cet appareil en fonction de l'écart absolu moyen par rapport à la ligne médiane et s'exprime en micromètres C.L.A. (*Center line Average*).

Certains appareils portatifs peuvent être utilisés directement sur la machine; ils permettent une lecture directe des rugosités. La plupart des appareils modernes permettent de donner à volonté la rugosité en micropouces R.M.S., en micromètres C.L.A. ou en hauteur totale tout en fournissant un enregistrement des rugosités du profil exploré considérablement agrandies (agrandissement de 40 à 100 000).

6.2.4. Intégrateur pneumatique de Nicolau. — La méthode d'intégration Nicolau permet d'évaluer directement la profondeur moyenne des sillons par comparaison avec un étalon optique de référence. Cette méthode utilise l'appareil Solex. Le gicleur de sortie (fig. III-29) caractérise le palpeur plan qui est placé en contact avec la surface de la pièce. La section d'écoulement de l'air n'est autre que la

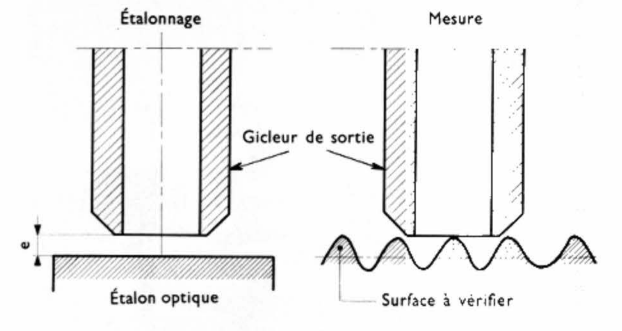


Fig. III-29 — Palpeur de Nicolau pour la mesure des états de surface

section des sillons se trouvant sous le gicleur. Les variations de hauteur sur le manomètre, représentent la valeur de la profondeur moyenne des sillons.

6.2.5. Appareil à coupe optique (procédé mis au point par le professeur Schmaltz). — Une lampe à incandescence éclaire une fente et un objectif en donne une image (trait lumineux) sur la surface à examiner (fig. III-30). L'observation de cette trace est effectuée à l'aide d'un microscope dont l'objectif permet exactement le même grossissement que l'objectif d'incidence. Les microscopes d'éclairage et d'observation sont orientés perpendiculairement l'un à l'autre. Ils sont inclinés à 45° par rapport à la surface à observer. Dans l'oculaire apparaît un réticule que l'on peut déplacer dans le champ visuel à l'aide d'un tambour gradué. La mesure est lue directement en micromètres

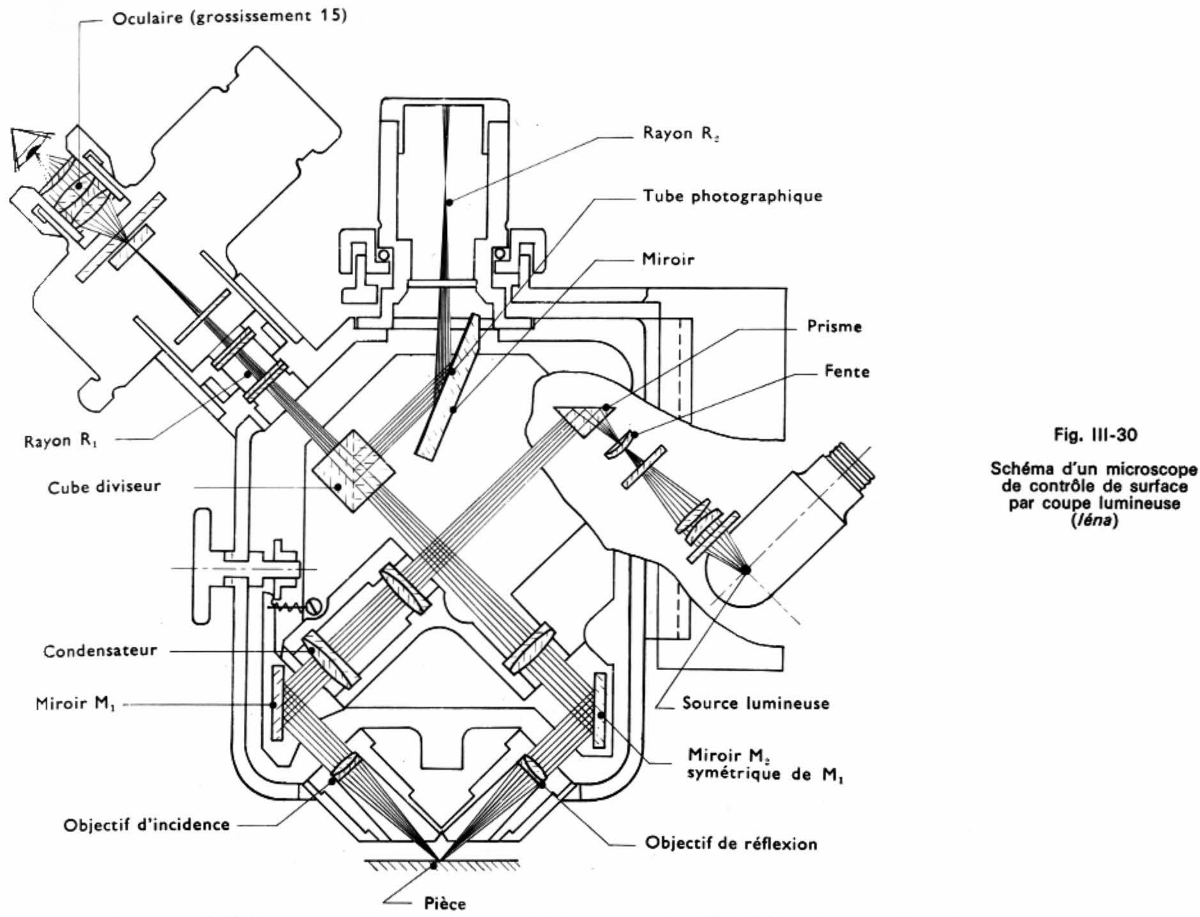


Fig. III-30

Schéma d'un microscope de contrôle de surface par coupe lumineuse (*Iéna*)

sur ce tambour gradué. Ces appareils sont très maniables mais ils ne permettent pas de mesurer des rugosités inférieures au micromètre. Leur champ d'application s'arrête à la mesure des rugosités de pièces rectifiées. Il existe également des rugomètres (fig. III-31) utilisant un dispositif d'interférences de la lumière. Ces appareils sont d'un emploi moins délicats que les interféromètres décrits précédemment et ils sont utilisables en atelier.

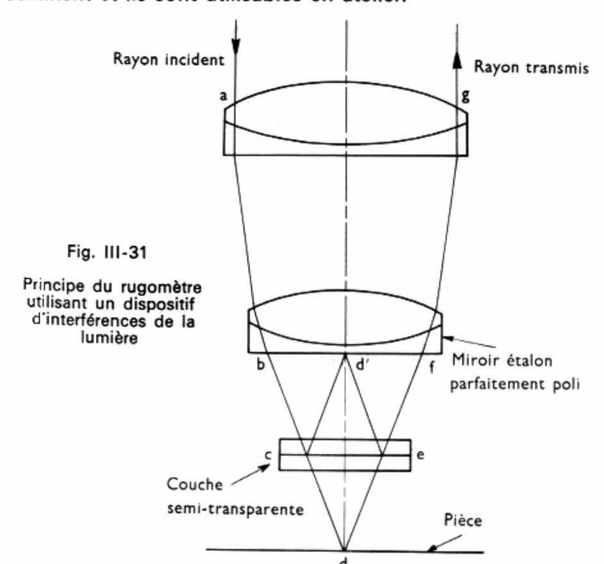


Fig. III-31

Principe du rugomètre utilisant un dispositif d'interférences de la lumière

On observe des franges d'interférences lorsque les trajets optiques a b c d e f g et a b c d' e f g diffèrent d'un nombre impair de longueurs d'onde. Les franges marquent donc l'intersection de la surface métallique et d'une famille de plans parallèles à la surface polie du verre. Ces plans sont équidistants et sont séparés par une distance égale au quart de la longueur d'onde de la radiation lumineuse utilisée. Ces franges sont des lignes qui correspondent à de véritables lignes de niveau de la surface examinée

7. VÉRIFICATION GÉOMÉTRIQUE ET PRATIQUE DES MACHINES-OUTILS

Est-il besoin de souligner toute l'importance que revêt dans l'industrie moderne la vérification géométrique et pratique des machines-outils ? En effet, la machine-outil est l'un des maillons de la chaîne « qualité et prix de revient » impératifs de l'industrie moderne. Cette vérification est non seulement nécessaire pour la réception de la machine neuve, mais périodiquement, elle s'avère indispensable pour s'assurer que la machine est utilisée à l'intérieur des limites de précision prescrites. À partir des spécifications de réception et de vérification des machines-outils (« Normes Salmon »), le Comité « 39 » machine-outil de l'ISO a publié en 1961 une recommandation (code d'essais des machines-outils). La norme française NF E 60-100 de juin 1965 confirme cette recommandation sous le titre *Code d'essais des machines-outils*, dispositions générales pour le contrôle de précision. Cette norme définit en outre l'ensemble des procédés de contrôles, l'emploi des instruments de vérifications, l'installation de la machine avant essais, les définitions concernant les vérifications géométriques, les contrôles spéciaux, les contrôles des épreuves pratiques. Des essais de fonctionnement et de puissance de la machine ainsi que des essais de fidélité des organes en mouvement complètent souvent les essais géométrique et pratique. Menés parallèlement avec la classification normalisée des machines-outils (NF E 60-010-011 janvier 1970), ces travaux ont abouti à la publication de normes sur les conditions d'essais des différents types de machines-outils NF E 60-100 et la suite, et complètent la norme NF E 60-100.

Remarques: Le contrôle de mise en place est la première opération pour tous les types de machines. Pour la vérification géométrique et les épreuves pratiques, tous les mouvements ne servant pas aux contrôles doivent être bloqués.

Vérification d'un tour de précision (d'après la norme NF E 60-101 de mars 1970. V. page suivante).

Tour d'outillage de haute précision (1) *DA* max = 500 mm ; *HP* max = 250 mm ; *EP* max = 1 500 mm		**VÉRIFICATIONS GÉOMÉTRIQUES** Énoncé des vérifications		
	Schémas	Objet de la mesure	Appareils de mesure recommandés	Erreur constatée en millimètres
1		**A. Contrôle de mise en place** Parallélisme des glissières avant et arrière du traînard à un plan horizontal.	Niveau et traverse	
2		Obliquité transversale des glissières du traînard.	Niveau et traverse	
3		Parallélisme des glissières du traînard à un plan vertical passant par la ligne des pointes.	Amplificateur à cadran et mandrin	
4		Parallélisme des glissières de la contre-poupée à celles du traînard : *a*) dans le plan horizontal ; *b*) dans le plan vertical.	Amplificateur à cadran	
5		**B. Pointe vive** Faux-rond de la pointe vive seule.	Amplificateur à cadran	
6		**C. Broche de poupée** Faux-rond du centrage du plateau.	Amplificateur à cadran	
7		Déplacement axial, sous pression constante, de la broche de poupée, dû : *a*) au voile des butées ; *b*) au voile de la face d'appui du plateau.	Amplificateur et pointe spéciale	
8		Faux-rond de l'axe du logement de la pointe vive : *a*) mesuré à la sortie du logement ; *b*) mesuré à une distance de la sortie égale à 300 mm.	Amplificateur et mandrin	

(1) *DA* signifie diamètre admissible au-dessus du banc ; *HP* signifie hauteur des pointes
(2) Le banc doit être bombé seulement, sans être sinueux
(3) Le signe + signifie, pour un tourneur placé à sa position normale de travail, ayant à sa gauche la poupée et, devant lui, les commandes : sens bas-haut, gauche-droite et avant-arrière

TECHNOLOGIE
DES MATÉRIAUX

MÉTAUX ET ALLIAGES

CHAPITRE PREMIER
ÉTAT MÉTALLIQUE ET PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX

1. DÉFINITION DE L'ÉTAT MÉTALLIQUE

Les gaz rares étant considérés à part, les éléments peuvent se diviser en deux catégories : les métaux et les métalloïdes.

Les métaux sont des corps simples qui se distinguent des métalloïdes par l'ensemble de leurs propriétés physiques et chimiques. Différents critères de l'état métallique permettent de reconnaître un métal d'un autre élément. Ces critères sont cependant de valeurs inégales dans la mesure où ils ne se réfèrent pas à la structure intime des métaux.

1.1. Critères apparents. — Des distinctions d'usage courant sont basées sur des propriétés directement observables lors d'un examen superficiel. On considère :

1° *L'opacité et l'éclat métallique.* — Lorsqu'ils sont massifs, les métaux ont la propriété de réfléchir vivement la lumière ce qui leur donne un aspect brillant caractéristique. Cependant de nombreux composés chimiques présentent cet aspect, certains sulfures par exemple, alors qu'ils ne répondent à aucun autre critère de l'état métallique.

2° *La conductibilité thermique.* — Les métaux sont bons conducteurs de la chaleur mais, par exemple, le coefficient de conductibilité thermique du mercure à 20 °C est très inférieur à celui du graphite, corps non métallique.

3° *La conductibilité électrique.* — Les métaux sont en général bons conducteurs de l'électricité, cependant on rencontre également des cristaux ioniques qui, dans certaines conditions, sont également bons conducteurs.

On voit qu'il est possible de définir un métal par ces propriétés mais que celles-ci ne sont pas totalement discriminantes. Il n'y a pas d'exemple d'une propriété commune à de nombreux métaux qu'on ne retrouve pour certains composés non métalliques, ou qui soit absente pour certains éléments indiscutablement métalliques.

1.2. Comportement chimique et électrochimique. Les métaux sont des éléments qui, combinés à l'oxygène, donnent des oxydes fortement basiques, et combinés aux acides, donnent des sels. Ces définitions, plus complètes que les précédentes, ne sont cependant pas encore suffisantes. En effet, certains métaux tels que l'aluminium sont amphotères.

— Lorsque l'on plonge des conducteurs métalliques dans des milieux conducteurs liquides, ceux-ci prennent un certain potentiel caractéristique de leur nature et du milieu électrolytique ; cette définition électrochimique s'applique également à d'autres composés.

Différentes classifications des éléments ont été effectuées. L'une d'entre elles, universellement adoptée, est la classification périodique ou classification de Mendeleeff : les éléments sont classés en groupes et en périodes. Dans cette classification (V. t. 1, Physique nucléaire) une diagonale descendant de gauche à droite et passant par le bore et l'iode constitue une séparation approximative entre métaux et métalloïdes. On constate, par ailleurs, des propriétés chimiques voisines pour des métaux classés dans un même groupe. Une autre classification couramment utilisée est la classification électrochimique où les métaux sont classés selon le potentiel qu'ils prennent par rapport à une électrode de référence (électrode à hydrogène) lorsqu'ils sont plongés dans un électrolyte. Les métaux dont le potentiel est positif sont dits nobles ; ce sont les métaux précieux (V. chap. 4, § 1.2.1).

Cependant, on doit noter que des considérations purement chimiques ou électrochimiques ne rendent pas compte des caractéristiques structurales très particulières propres à ces éléments et qui finalement les distinguent des métalloïdes. Ainsi, l'étain possède deux formes allotropiques dont l'une (étain blanc) est typiquement métallique et dont l'autre (étain gris) n'est pas métallique.

Les considérations chimiques ne permettent donc pas de définir de façon univalente les éléments métalliques.

1.3. Critères physiques. La liaison métallique. — L'état métallique est bien mieux défini en tenant compte de la structure électronique de ces éléments, structure dont découle leur mode d'assemblage cristallin. De ces propriétés élémentaires dépendent toutes les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques.

Les métaux sont caractérisés par le type de liaison particulière de leurs atomes au sein du cristal (liaison métallique). Dans ce type de liaison, on distingue deux parties : la première constituée des noyaux et des électrons internes qui sont fortement liés à ces noyaux, l'ensemble formant des ions positifs ; la seconde constituée par les électrons de valence faiblement liés aux noyaux et

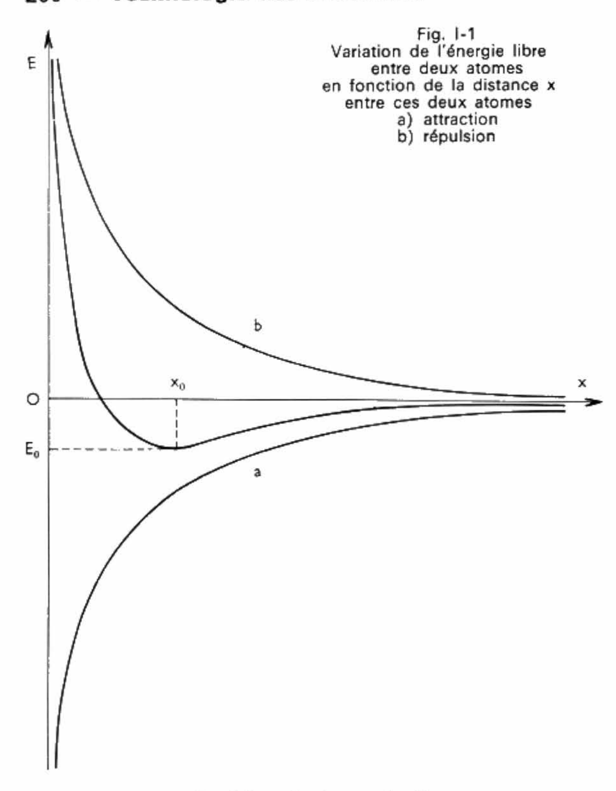
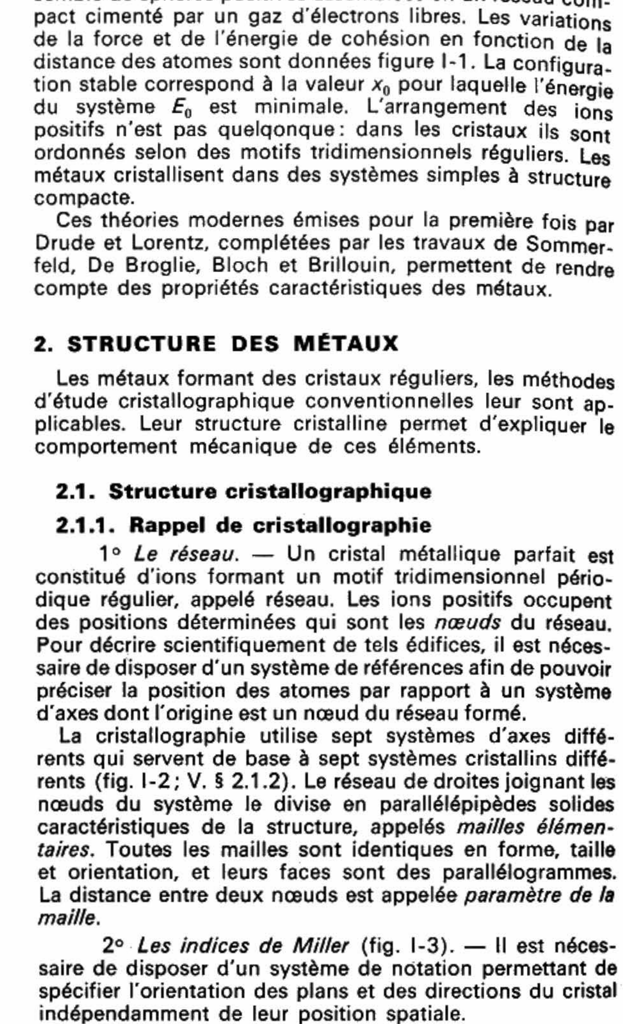


Fig. I-1
Variation de l'énergie libre entre deux atomes en fonction de la distance x entre ces deux atomes
a) attraction
b) répulsion



formant un « gaz » électronique cimentant les ions positifs. La force de liaison assurant la cohésion de l'ensemble provient de l'attraction des ions positifs par les électrons de valence négatifs circulant perpétuellement entre eux. En résumé, on peut considérer un métal comme un ensemble de sphères positives assemblées en un réseau compact cimenté par un gaz d'électrons libres. Les variations de la force et de l'énergie de cohésion en fonction de la distance des atomes sont données figure I-1. La configuration stable correspond à la valeur x_0 pour laquelle l'énergie du système E_0 est minimale. L'arrangement des ions positifs n'est pas quelqonque : dans les cristaux ils sont ordonnés selon des motifs tridimensionnels réguliers. Les métaux cristallisent dans des systèmes simples à structure compacte.

Ces théories modernes émises pour la première fois par Drude et Lorentz, complétées par les travaux de Sommerfeld, De Broglie, Bloch et Brillouin, permettent de rendre compte des propriétés caractéristiques des métaux.

2. STRUCTURE DES MÉTAUX

Les métaux formant des cristaux réguliers, les méthodes d'étude cristallographique conventionnelles leur sont applicables. Leur structure cristalline permet d'expliquer le comportement mécanique de ces éléments.

2.1. Structure cristallographique

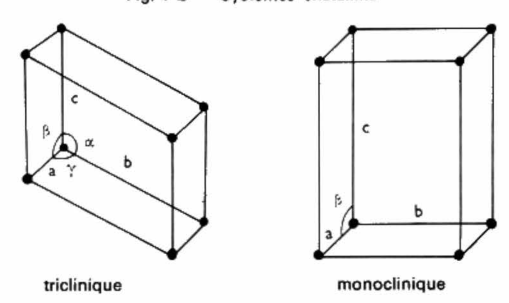
2.1.1. Rappel de cristallographie

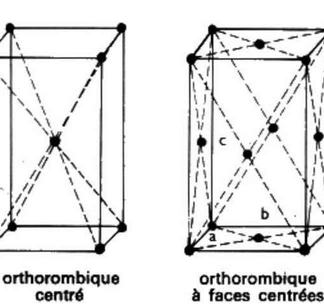
1° *Le réseau.* — Un cristal métallique parfait est constitué d'ions formant un motif tridimensionnel périodique régulier, appelé réseau. Les ions positifs occupent des positions déterminées qui sont les *nœuds* du réseau. Pour décrire scientifiquement de tels édifices, il est nécessaire de disposer d'un système de références afin de pouvoir préciser la position des atomes par rapport à un système d'axes dont l'origine est un nœud du réseau formé.

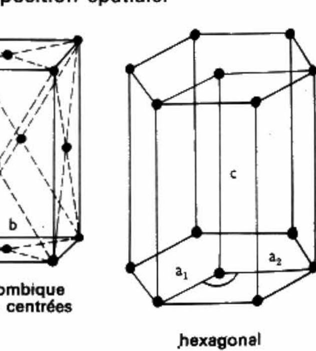
La cristallographie utilise sept systèmes d'axes différents qui servent de base à sept systèmes cristallins différents (fig. I-2 ; V. § 2.1.2). Le réseau de droites joignant les nœuds du système le divise en parallélépipèdes solides caractéristiques de la structure, appelés *mailles élémentaires*. Toutes les mailles sont identiques en forme, taille et orientation, et leurs faces sont des parallélogrammes. La distance entre deux nœuds est appelée ***paramètre de la maille***.

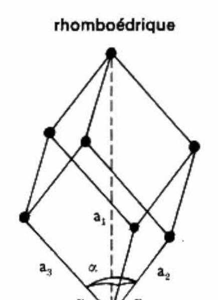
2° *Les indices de Miller* (fig. I-3). — Il est nécessaire de disposer d'un système de notation permettant de spécifier l'orientation des plans et des directions du cristal indépendamment de leur position spatiale.

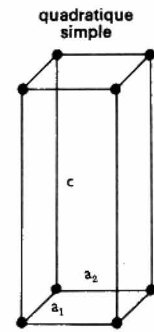
Fig. I-2 — Systèmes cristallins

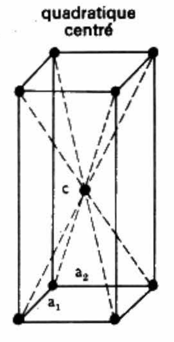


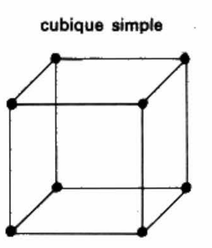


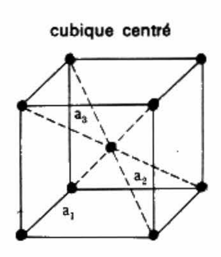


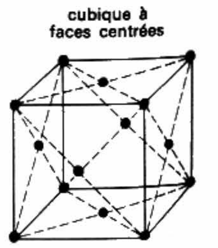












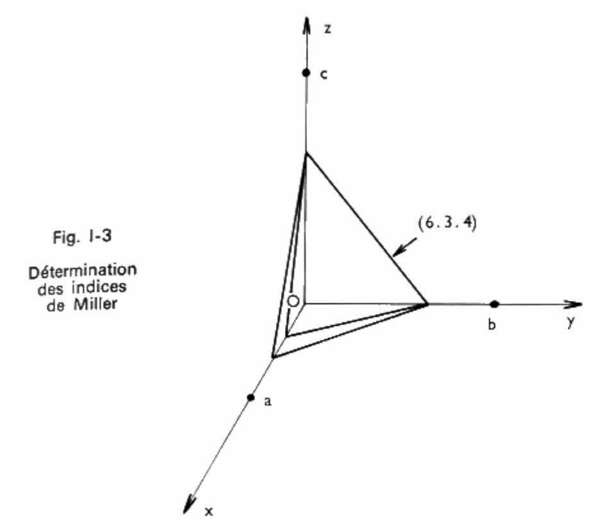


Fig. I-3

Détermination des indices de Miller

On utilise le système des indices de Miller qui sont définis par l'intersection d'un plan avec les trois axes du trièdre de base de la maille. On caractérise ces intersections par l'inverse de la fraction de la longueur du paramètre de la maille qu'elles déterminent sur l'axe considéré. Ainsi, si le plan coupe l'axe des x à une distance qui correspond à la moitié de cette valeur, l'indice correspondant est $\frac{1}{1/2} = 2$; si le plan est parallèle à l'un des axes, l'indice est égal à $\frac{1}{\infty} = 0$.

En résumé, on procède de la façon suivante :

— on recherche les intersections du plan considéré avec les trois axes et on les exprime en fonction de l'unité de longueur axiale ;

— on prend l'inverse de ces nombres ;

— on réduit cet ensemble aux trois plus petits entiers ayant le même rapport.

Si les indices se rapportent à un plan unique ou une série de plans parallèles, ils sont mis entre parenthèses, exemple : (1.0.0). S'ils se rapportent à un ensemble de plans équivalents, on place les indices entre accolades ; exemple : {1.1.1}. Une direction cristallographique particulière est caractérisée par des indices mis entre crochets ; exemple : [1.1.0]. Un ensemble de directions 'équivalentes se note $<1.1.2>$.

2.1.2. Mode de cristallisation des métaux

1° *Type d'arrangement atomique dans les cristaux métalliques* (V. fig. I-2). — La plupart des métaux cristallisent dans des systèmes simples à structure très compacte. Les systèmes cristallins les plus couramment observés sont :

— Le système cubique à faces centrées dans lequel la maille est représentée par un cube possédant un atome à chaque sommet et un atome au centre de chacune des faces. Les métaux suivants cristallisent dans ce système : Cu, Al, Ag, Au, Pb, Ni, Pt, Fe γ.

— Le système hexagonal compact dans lequel la maille est représentée par un prisme dont le plan de base est un hexagone. Ce prisme hexagonal peut être décomposé en six prismes triangulaires dont la hauteur est égale à 1,6 fois le côté de l'hexagone de base environ. Il y a un atome au sommet de chacun des prismes triangulaires et un au centre d'un prisme triangulaire sur deux. Mg, Be, Zn, Cd cristallisent dans ce système.

— Le système cubique centré dans lequel les atomes occupent les sommets et le centre du cube représentant la maille. Les métaux tels que Fe α, Cr, Mo, W, cristallisent dans ce système.

Il existe d'autres systèmes moins répandus qui correspondent au mode de cristallisation de certains métaux : orthorhombique (Ga), quadratique (Sn β), rhomboédrique (As, Sb, Bi) ; on remarque que ces systèmes se rencontrent fréquemment pour des éléments dont le caractère métallique n'est pas nettement accusé.

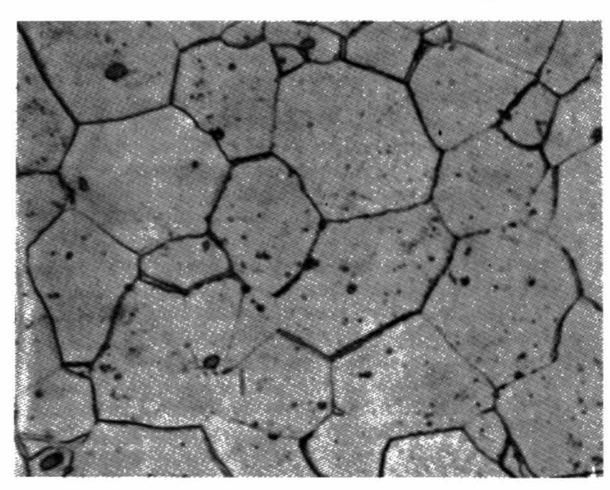
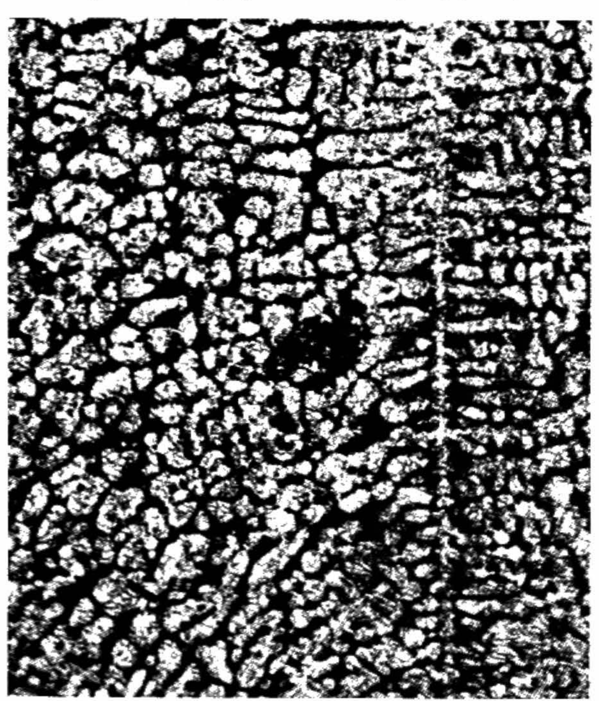


Fig. I-4 — Structure micrographique d'un métal pur (X 500)

2° *Les métaux polycristallins.* — En général, les objets métalliques ne se présentent pas sous la forme de monocristaux mais sous celles d'agrégats polycristallins où l'on rencontre un grand nombre de petits monocristaux, ou grains juxtaposés. Chaque grain a une forme polyédrique irrégulière et est séparé de ses voisins par une limite de grain (fig. I-4). Dans les métaux industriels, l'orientation cristalline des différents grains est généralement désordonnée ; cependant dans certains cas, on observe des orientations préférentielles où certaines directions cristallines sont réparties autour d'une direction moyenne. L'état polycristallin est favorisé par les méthodes d'élaboration, notamment lors de la solidification qui se produit par apparition d'un certain nombre de germes donnant naissance à autant de cristaux qui se développent aux dépens du liquide selon des directions cristallographiques privilégiées en formant des dendrites (fig. I-5). À un certain stade de leur développement, leur rencontre avec des cristaux voisins stoppe leur croissance, et une limite de grain se forme entre cristaux contigus. Les joints de grains sont d'étroites zones de transition dans lesquelles l'ordonnancement cristallographique passe progressivement de la structure d'un grain à celle de son voisin.

Fig. I-5 — Micrographie de dendrites (X 25) (*IRSID*)



3° *Les imperfections cristallines.* — Les cristaux considérés jusqu'à présent possèdent une structure parfaitement régulière dans tout l'espace qu'ils occupent. Un tel cristal est dit *cristal idéal*. Un cristal réel n'est pas parfait, il possède un certain nombre de défauts. Cette notion de défauts a été introduite pour expliquer la faible énergie nécessaire pour déformer pratiquement un cristal, comparativement à l'énergie théorique que l'on détermine par le calcul en partant de l'hypothèse d'un cristal parfait. On distingue trois sortes de défauts :

— les *lacunes* qui sont provoquées par l'absence d'atomes en certains points du réseau (fig. I-6) ;
— les *dislocations de Taylor* ou dislocations coin ;
— les *dislocations vis* ou dislocations de Bürgers.

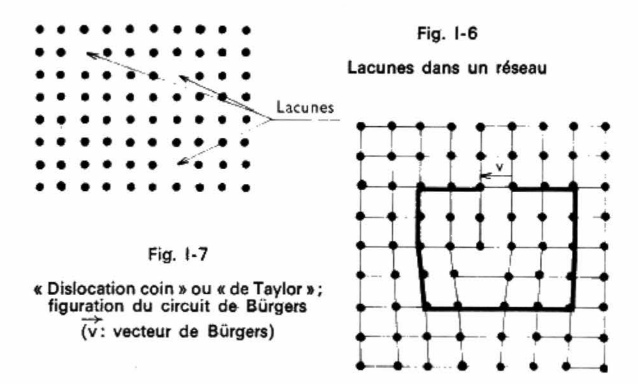


Fig. I-6

Lacunes dans un réseau

Fig. I-7

« Dislocation coin » ou « de Taylor » ; figuration du circuit de Bürgers ($\vec{v}$: vecteur de Bürgers)

On considère un cristal parfait dont tous les plans sont parallèles, si l'on ajoute ou si l'on retire un demi-plan, le nombre de plans constituant le cristal sera égal à n pour la partie non perturbée, et à $(n-1)$ ou $(n+1)$ pour la partie modifiée (fig. I-7). On appelle *ligne de dislocation*, le défaut linéaire créé à l'endroit du réseau où l'on passe de n à $(n+1)$ ou à $(n-1)$ plans. Ce type de dislocation est dit « dislocation de Taylor » ou « dislocation coin », il est déterminé par le vecteur de Bürgers dont la longueur est la plus petite distance interatomique observable dans le système étudié et dont la direction est orthogonale à la ligne de dislocation. La ligne de dislocation et le vecteur de Bürgers définissent un plan dit *plan de glissement*.

Lorsque le déplacement est parallèle à la ligne de dislocation, la dislocation produite est une « dislocation vis » ou « dislocation de Bürgers » (fig. I-8). Elle est également définie par le vecteur de Bürgers : dans ce cas, il est parallèle à la ligne de dislocation et il n'y a pas de plan de glissement bien défini.

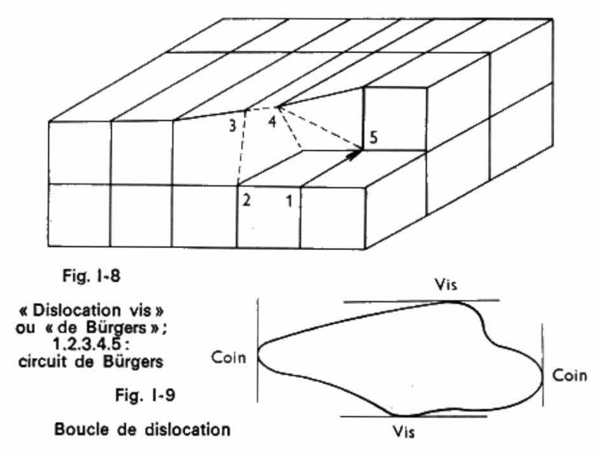


Fig. I-8

« Dislocation vis » ou « de Bürgers » ; 1.2.3.4.5 : circuit de Bürgers

Fig. I-9

Boucle de dislocation

Bien souvent les lignes de dislocations ne sont pas des droites. Dans ce cas, on peut décomposer la dislocation en dislocation vis et dislocation coin (fig. I-9).

2.1.3. Déformation des métaux

1° *Les plans de glissement.* — La déformation des métaux se traduit par des glissements des plans de densité atomique maximale selon les directions de densité atomique maximale. Dans les systèmes cristallins les plus fréquemment rencontrés en métallurgie, on distingue :

— *Système cubique centré* (fig. I-10). Il y a six familles de plans équivalents à *A B C D*, plans {1.1.0}, et deux directions <1.1.1> de glissement pour chaque famille, soit au total douze systèmes théoriques de glissement. En réalité le système cubique centré n'étant pas compact, d'autres plans peuvent également glisser, notamment les plans {1.1.2} et le nombre total de systèmes est égal à quarante-huit.

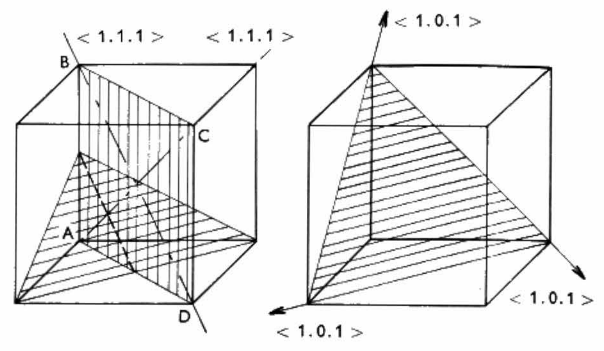


Fig. I-10 — Système de glissement cubique centré

Fig. I-11 — Système de glissement cubique à faces centrées

— *Système cubique à faces centrées* (fig. I-11). — On définit quatre familles de plans de densité atomique maximale {1.1.1} et trois directions de glissement <1.0.1>, soit au total douze systèmes de glissement.

— *Système hexagonal compact* (fig. I-12). — Il n'y a qu'une seule famille de plans de densité atomique maximale correspondant aux plans de base et trois directions de glissement, soit au total trois systèmes de glissement. Lorsque la compacité n'est pas maximale, d'autres plans de glissement peuvent être mis en évidence.

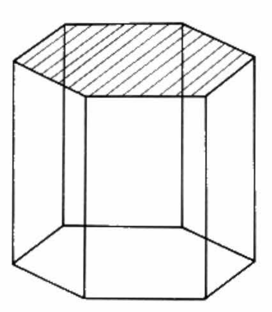


Fig. I-12

Système de glissement hexagonal compact

2° *La contrainte critique de cisaillement.* — Pour que les plans de densité atomique glissent les uns sur les autres, il est nécessaire de leur appliquer une contrainte suffisante, dite *contrainte critique de cisaillement*.

Soit un cristal du système cubique *A B C D* (fig. I-13), fixé en *AD*, dont la section de base est S. Si on lui applique une contrainte de cisaillement $\tau = \frac{F}{S}$ croissante, le cristal se déforme. Tout d'abord la déformation est réversible (*AB'C'D*) : c'est la déformation élastique. Ensuite, lorsque τ est égal à la contrainte critique de cisaillement τ_c, il se produit un glissement brusque selon un plan xy ; l'amplitude du glissement est un multiple du paramètre cristallin. Ce phénomène correspond à une déformation plastique

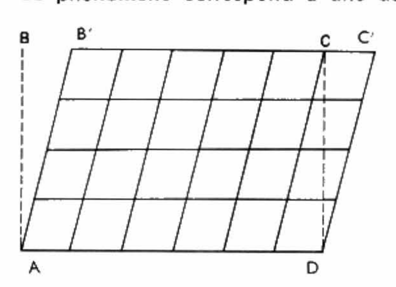


Fig. I-13

Déformation élastique d'un cristal cubique

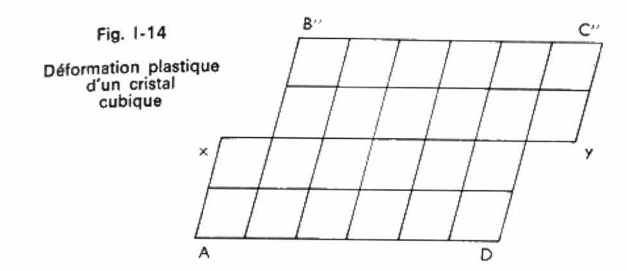


Fig. I-14

Déformation plastique d'un cristal cubique

irréversible (fig. I-14) ; τ_c est une donnée caractéristique du métal considéré.

Lors d'une déformation, le même mécanisme se répète pour de nombreux plans sensiblement équidistants, mais la densité et la structure restent pratiquement inchangées, la continuité des plans atomiques étant rétablie. La série de glissements fait apparaître à la surface du cristal une série de lignes dites *lignes de glissement*.

Lorsque la contrainte n'est pas appliquée parallèlement aux plans de glissement (fig. I-15), la déformation se produit de la façon suivante : dans un barreau monocristallin cylindrique de section s auquel on applique une contrainte de traction, lorsque l'effort de traction F dépasse une certaine valeur F_c, des blocs cristallins glissent les uns sur les autres et ont tendance à s'orienter parallèlement à la direction de l'effort. On appelle S la section elliptique du barreau correspondant à un plan de glissement et OG la direction de glissement dans ce plan. La force F admet :

— une composante F_N normale au plan S ; elle n'a aucune action car elle est perpendiculaire au plan de glissement

— une composante F_G située dans le plan de glissement et orientée dans la direction de glissement : elle va provoquer la déformation.

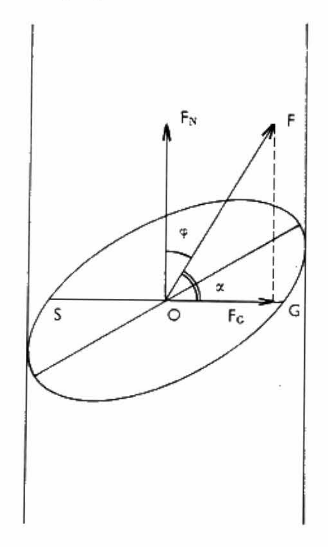


Fig. I-15

Contrainte appliquée dans une direction non parallèle au plan de cisaillement

On peut écrire :

$$\tau = \frac{F_G}{S} = \frac{F \cos \alpha}{S}$$

or : $s = S \cos \varphi$ d'où : $\tau_c = \dfrac{F_c}{s} \cos \alpha \cos \varphi$

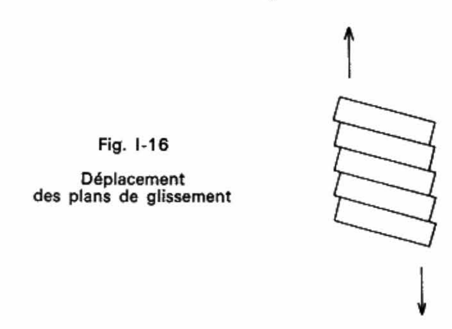


Fig. I-16

Déplacement des plans de glissement

Si le cristal se déforme librement, il se cisaille sans que son orientation soit modifiée. Au contraire, si ses extrémités ne sont pas libres (machine de traction, par exemple) :

— pour les systèmes hexagonaux, les plans et les directions de glissement ont tendance à devenir parallèles à la contrainte (fig. I-16)

— pour le système cubique à faces centrées le glissement débute sur la famille de plans de glissement dont l'inclinaison est la plus proche de 45° par rapport à la direction de la contrainte. Au cours de la déformation, le cristal tourne et d'autres systèmes atteignent successivment la position favorable de sorte que le glissement continue avec le nouveau système.

Ces considérations ont été établies pour des monocristaux. Les métaux usuels sont formés d'agrégats polycristallins et les phénomènes sont plus complexes : la déformation est hétérogène, et variable d'un grain à l'autre en fonction de leur orientation et de leur interaction. On constate, en particulier, une influence des joints de grain et de la grosseur des grains. Il en résulte des tensions très importantes qui ne cessent de croître pendant la déformation, et la freinent. Ces tensions subsistent après suppression de l'effort, provoquant une élévation de la limite élastique.

Lorsque la force appliquée dépasse une intensité déterminée pour chaque métal ; intensité fonction de la température et des conditions physiques et chimiques (alliages), l'échantillon se rompt. En général, on peut observer simultanément des ruptures par clivage et cisaillement dans les échantillons polycristallins. Les ruptures par clivage correspondent à des ruptures fragiles ; les ruptures par cisaillement correspondent à des ruptures ductiles. Dans certaines conditions (déformation lente à température élevée), on observe des ruptures intergranulaires.

3° *Mécanisme de déformation par déplacement de dislocations.* — La théorie exposée rend compte des résultats visibles de la déformation plastique mais elle n'explique pas les contraintes nécessaires à cette déformation ; le calcul supposant le glissement simple de deux plans parallèles donne des résultats 1 000 à 10 000 fois supérieurs à la contrainte réduite critique des monocristaux déterminés de façon expérimentale.

Au contraire, si l'on imagine que le cristal n'est pas parfait mais possède des défauts appelés dislocations (V. ci-dessus), qui s'étendent dans un plan de glissement sous l'effet de contraintes faibles, il est possible d'expliquer la faible limite au cisaillement des cristaux métalliques.

La ligne de dislocation et le vecteur de Bürgers $\vec{B}$ définissent le plan de glissement. Les dislocations peuvent se déplacer dans le plan de glissement qui les contient. Par conséquent : pour une dislocation coin, le déplacement ne peut avoir lieu que selon un plan alors que pour une dislocation vis, $\vec{B}$ étant parallèle à la ligne de dislocation, le déplacement peut se faire dans tous les plans de glissement qui la contiennent.

Lorsqu'une contrainte suffisante est appliquée à un cristal, il est possible de supposer qu'il y a apparition d'un décalage réticulaire au-dessus du plan xy (fig. I-17). Ce tassement équivaut à l'insertion d'un demi-plan atomique supplémentaire s'arrêtant en A, et, par conséquent, création d'une dislocation coin qui peut se déplacer de proche en proche à travers le cristal, puis disparaître sur l'autre face en laissant une marche sans que le réseau soit autrement perturbé. Si l'on polit la surface d'un cristal déformé, on observe des lignes de glissement qui correspondent aux plans de glissement. Ce mécanisme est équivalent au mécanisme de cisaillement, mais au lieu de rompre simultanément toutes les liaisons de deux plans, on ne rompt que celles qui correspondent à une ligne. Cette représentation permet de rendre

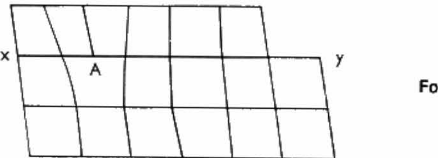


Fig. I-17

Formation d'une dislocation

compte des différences constatées entre les valeurs théoriques et expérimentales de τ_c.

Les dislocations présentent un certain nombre de propriétés remarquables :

— *Énergie.* — L'énergie d'une dislocation est proportionnelle au carré du vecteur de Bürgers $W = KB^2$. C'est donc la dislocation qui correspond au vecteur de Bürgers de plus faible module qui est la plus stable (fig. I-18).

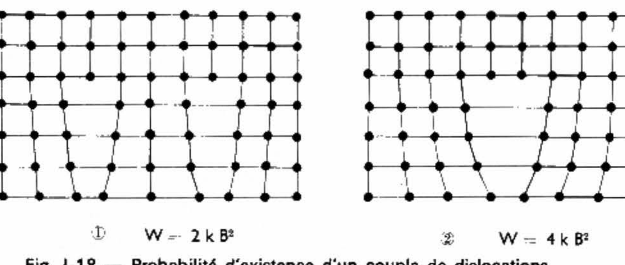


Fig. I-18 — Probabilité d'existence d'un couple de dislocations

— *Interaction entre dislocations.* — Si une dislocation positive et une dislocation négative se rencontrent, elles s'attirent et s'annulent avec formation d'une lacune si leur plan de glissement n'est pas absolument le même (fig. I-19). Lorsque deux dislocations coin se croisent, il y a formation de cran : ainsi la dislocation *xy* laisse sur la dislocation *AB* un cran *DD'* égal au vecteur de Bürgers de *xy* (fig. I-20). Lorsqu'une dislocation coin et une dislocation vis se croisent, il y a également formation d'un cran égal au vecteur de Bürgers de celle-ci (fig. I-21). On peut dire qu'en règle générale, lorsqu'une dislocation en croise une autre chacune acquiert un cran égal à la composante normale à son propre plan de glissement, du vecteur de Bürgers de l'autre dislocation. La formation d'un cran provoque une

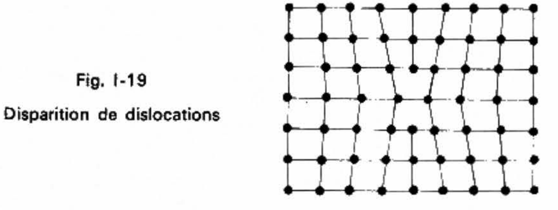


Fig. I-19

Disparition de dislocations

absorption d'énergie et un freinage. Le cran lui-même peut être une source de freinage s'il est mal orienté ou de blocage s'il n'est pas situé dans un plan de glissement convenablement orienté.

— *Interaction des dislocations avec les défauts du réseau.* — Toute perturbation dans la périodicité d'un réseau freine le déplacement des dislocations. Par conséquent les impuretés (alliages) ou la multiplication des dislocations, provoquent une élévation de la contrainte critique ; dans ce dernier cas on assiste à un renforcement par écrouissage avec perte de plasticité (formation de cran).

— *Multiplication de dislocations.* — Lors d'une déformation les dislocations se multiplient et permettent des glissements plus nombreux ; simultanément leur multiplication

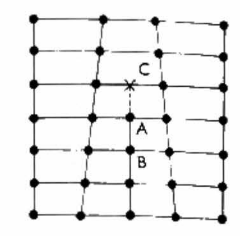


Fig. I-22

Montée d'une dislocation

gêne leur mobilité et provoque la consolidation du réseau.

— *Montée.* — Une dislocation coin peut changer de plan soit lorsque l'atome *A* disparait par intersection avec une lacune dont il prend la place, soit lorsque l'atome *C* peut s'approcher (fig. I-22).

— *Interaction avec les joints de grains.* — Les dislocations ne peuvent franchir un tel obstacle et ne peuvent disparaître, la surface n'étant pas libre. Sur le joint elles forment un « empilement » ; comme elles se repoussent (étant de même signe), pour une contrainte donnée, elles cessent de se multiplier. La contrainte locale qu'elles créent peut être suffisante pour déclencher un glissement dans le grain voisin.

— *Interaction avec les éléments d'addition.* — La présence d'atomes étrangers dans un réseau perturbe la périodicité de celui-ci et, par conséquent, entrave le déplacement des dislocations : les caractéristiques mécaniques sont ainsi améliorées. Lorsque le soluté est réparti au hasard dans le réseau, il y a interaction faible entre la dislocation et ces atomes. Au contraire, si la distribution, au moins dans certaines régions, n'est plus aléatoire, on constate un effet nettement plus important. Cottrel a montré que l'énergie d'un cristal, contenant des atomes de soluté, est plus faible lorsque ceux-ci sont rassemblés au voisinage des dislocations, et compensent tant bien que mal les distorsions du réseau. Pour déplacer la dislocation, il est nécessaire de fournir une énergie supplémentaire afin de la libérer de ce groupement d'atomes (nuage de Cottrel). Un exemple très connu est l'anomalie de limite élastique (limite élastique apparente) observée sur l'acier doux (solution solide interstitielle de carbone dans le fer). La courbe de traction (fig. I-23) présente une limite élastique inférieure et

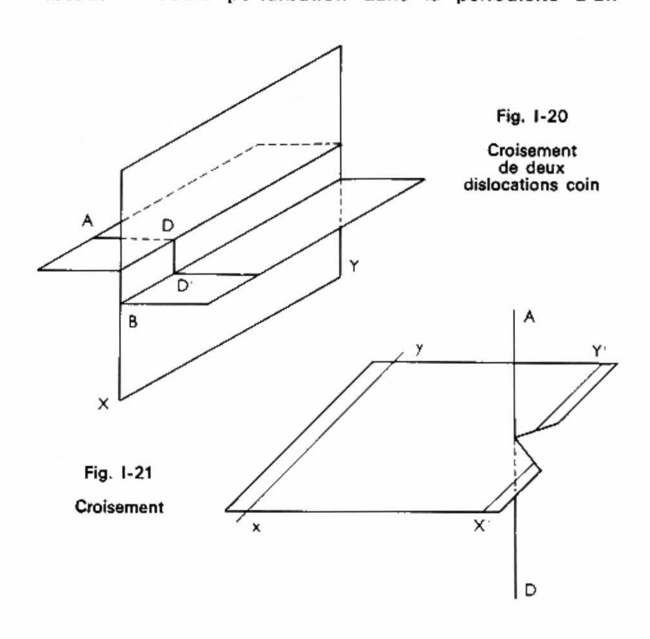


Fig. I-20

Croisement de deux dislocations coin

Fig. I-21

Croisement

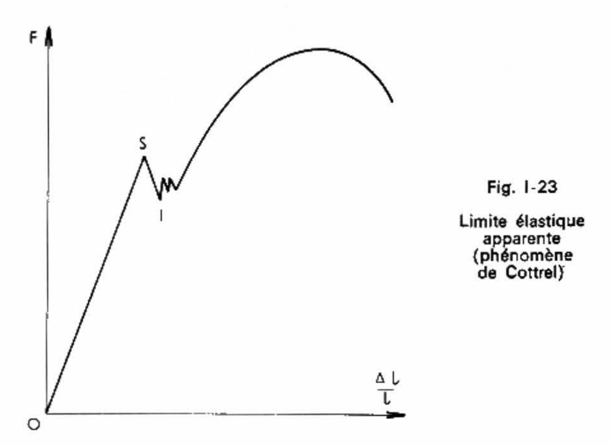


Fig. I-23

Limite élastique apparente (phénomène de Cottrel)

une limite élastique supérieure ; il est nécessaire d'appliquer une contrainte supérieure *S* afin de libérer la dislocation de son nuage de Cottrel. Elle se multiplie ensuite et une contrainte plus faible correspondant à *I* est alors nécessaire pour poursuivre la déformation. On rencontre des phénomènes analogues dans certains alliages légers (phénomène Portevin - Le Châtelier).



Fig. I-24

Mécanisme de Fischer

L'augmentation des caractéristiques mécaniques peut également être provoquée par un mécanisme, mis en évidence par Fischer. Dans les alliages, il existe fréquemment des régions où l'énergie du réseau est abaissée par la création d'un ordre à courte distance. Un glissement selon un plan traversant ces régions nécessite une énergie déterminée afin de détruire cet ordre (fig. I-24). Suzuki a montré que, dans certains cas, le soluté se rassemblait préférentiellement dans les plans de défaut d'empilement, la dislocation associée est donc freinée; en outre, les croisements sont plus difficiles car elle doit se recombiner et chasser le soluté.

4° *Propriétés mécaniques des métaux.* — Les considérations précédentes permettant de mieux comprendre le mécanisme des déformations, on peut considérer les différentes propriétés mécaniques des métaux.

a) *Déformation élastique.* — Lorsque les contraintes sont inférieures à celles nécessaires pour provoquer le déplacement des dislocations, les déformations imposées à un échantillon métallique sont élastiques. En d'autres termes, si la contrainte exercée axialement n'a pas dépassé une certaine valeur appelée *limite élastique*, l'échantillon reprend ses dimensions lorsque l'effort cesse. La déformation est réversible, élastique et proportionnelle à l'effort. Donc, si l'on impose une contrainte $\tau = \frac{F}{S}$, on constate un allongement relatif $\frac{\Delta l}{l}$ proportionnel à τ. On peut écrire :

$$\tau = \mu \frac{\Delta l}{l}$$

Le coefficient de proportionnalité μ est appelé *module d'élasticité* ou *module d'Young*. Il est fonction de la nature du matériau. Il correspond à la tangente à la courbe de cohésion pour la position d'équilibre x_0 (fig. I-25 et I-26).

Un troisième coefficient peut également être envisagé : le *coefficient de Poisson* ν. Lorsque l'on déforme un cristal métallique cylindrique par traction, son rayon R diminue et le coefficient de Poisson est égal à :

$$\nu = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l}{\Delta l}$$

Si le volume restait constant pendant la déformation, on pourrait écrire : $\pi R^2 l = \pi (R - \Delta R)^2 (l + \Delta l)$ ou : $R^2 \Delta l \approx 2Rl\Delta R$ soit : $\nu = 0{,}5$. En réalité ν est toujours inférieur à 0,5 (voisin de 0,3), ce qui signifie que la densité diminue.

La température a une influence sur le module d'Young : lorsqu'elle croît, le module diminue. De plus, on doit noter que le module des métaux croît avec leur température absolue de fusion. Lorsqu'on ajoute un élément dans un métal pour former une solution solide, le module varie et, en règle générale, l'addition d'un métal à module élevé augmente celui de la solution. Lorsque la concentration en élément étranger croît, tant que le système reste en solution solide, le module varie lentement avec la concentration ; dans le cas d'additions importantes peuvent apparaître de nouvelles phases, de module totalement différent, les types de liaison n'étant plus les mêmes. Dans de larges limites, le module est indépendant de la répartition des phases en présence et de la grosseur du grain, cependant, à la limite pour des échantillons monocristallins, le module est différent selon les directions cristallographiques considérées. La pseudo-isotropie observée dans les agrégats polycristallins est due à la répartition aléatoire des directions cristallographiques des grains ; à la suite d'un traitement provoquant des orientations préférentielles, l'échantillon tend à se comporter comme un monocristal.

b) *Déformation plastique.* — Lorsque la contrainte critique τ_c est dépassée, la déformation n'est plus réversible et les cristaux métalliques se déforment selon le mécanisme exposé ci-dessus (V. § 2.1.3). Le graphique des contraintes en fonction des allongements pour un échantillon mono-

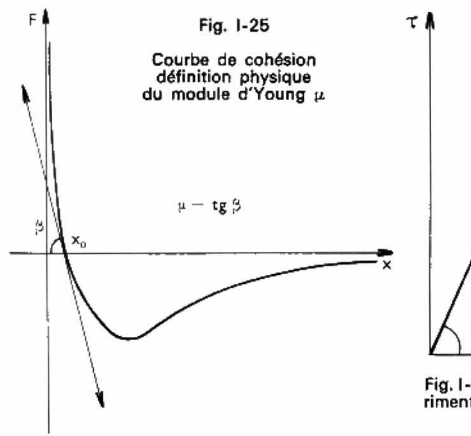


Fig. I-25

Courbe de cohésion définition physique du module d'Young μ

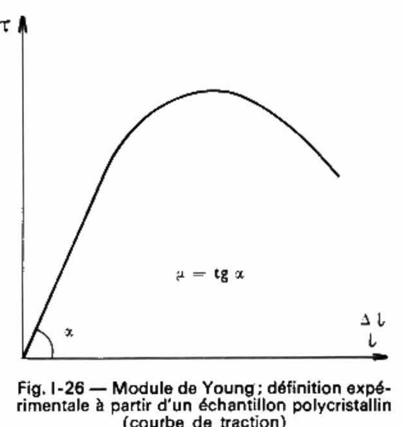


Fig. I-26 — Module de Young ; définition expérimentale à partir d'un échantillon polycristallin (courbe de traction)

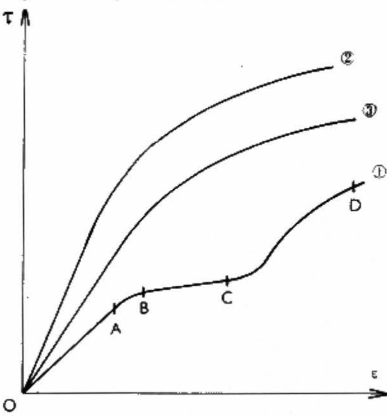


Fig. I-28 — Variation de la contrainte τ en fonction de l'allongement $\varepsilon = 100 \frac{\Delta l}{l}$ pour un métal CFC
1. monocristal orienté favorablement (τ_c : ordonnée du point A) ; 2. monocristal orienté défavorablement ; 3. échantillon polycristallin

Pour une contrainte latérale, on définit un module de cisaillement G tel que : $\tau = G \frac{\Delta u}{l}$ (fig. I-27).

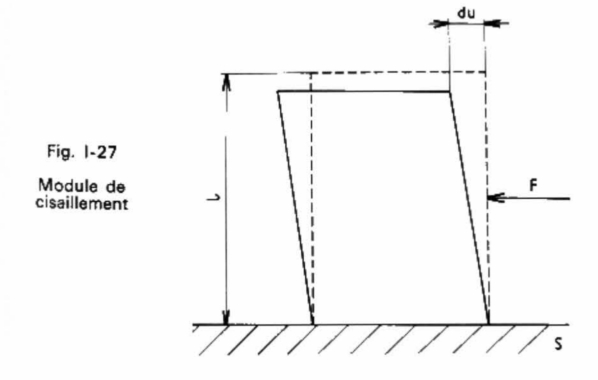


Fig. I-27

Module de cisaillement

cristallin soumis à une contrainte axiale est donné sur la figure I-28 (cas d'un système cubique à faces centrées). Pour le segment *OA*, la déformation est élastique et réversible. Pour le segment *AB*, la contrainte ayant dépassé la valeur critique, les dislocations les mieux orientées par rapport à celle-ci se déplacent de façon irréversible. Pour le segment *BC*, il y a multiplication des dislocations provoquant un allongement avec faible durcissement. Pour le segment *CD*, d'autres systèmes de glissement et d'autres sources de multiplication de dislocation se trouvent sollicités ; les dislocations de ces nouveaux systèmes se croisent et se combinent avec les précédentes formant des crans, et provoquant des perturbations du réseau qui finissent par bloquer les déplacements. Ce phénomène de durcissement par multiplication et blocage de dislocations est appelé *écrouissage*.

Dans le cas d'un agrégat polycristallin, chaque grain est solidaire de ses voisins. La cohésion de l'agrégat impose que les surfaces des grains, en contact le long des joints, puissent se déformer librement sans apparition de fissures. Taylor a démontré que le cristal doit posséder au moins cinq systèmes de glissement pour s'accommoder de la déformation des grains contigus. Pour le système hexagonal compact, cette condition n'est pas réalisée (trois systèmes de glissement) : on observe une limite élastique plus élevée et des allongements plus faibles que dans le cas d'un monocristal. Pour le système cubique à faces centrées, les différentes valeurs sont comprises entre celles obtenues avec un monocristal bien orienté par rapport à la direction de la contrainte et un monocristal mal orienté par rapport à cette même direction. Le diamètre et l'orientation des grains des échantillons polycristallins ont donc une très grande influence sur les propriétés mécaniques des métaux. La limite élastique varie comme l'inverse de la racine carrée du diamètre des grains ; on a donc pratiquement intérêt à avoir une structure fine pour améliorer les caractéristiques mécaniques et la pseudo-isotropie (à condition de détruire les orientations préférentielles).

De plus, certaines déformations sont provoquées par *maclage;* le maclage résulte d'un cisaillement homogène de certains plans cristallins sous l'effet d'une contrainte de telle sorte que la partie maclée soit l'image spéculaire du cristal intéressé par rapport au plan de macle.

Un dernier type de déformation est la déformation par *fluage*: à une température déterminée on constate un écoulement plastique du métal en fonction du temps soumis à une contrainte donnée inférieure à la limite élas-

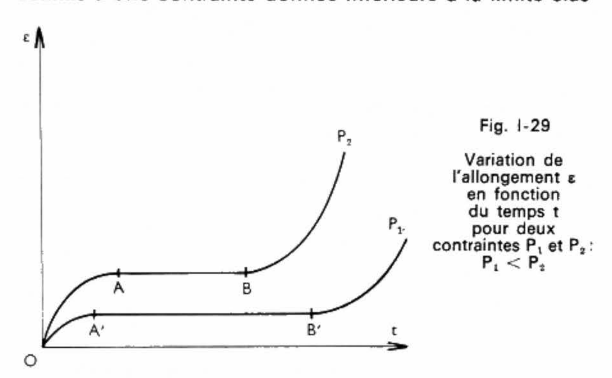


Fig. I-29

Variation de l'allongement ε en fonction du temps t pour deux contraintes P_1 et P_2 : $P_1 < P_2$

tique (fig. I-29). Lorsqu'on applique la charge, il se produit un allongement immédiat par déformation élastique puis on observe :

— un stade primaire *OA* au cours duquel la vitesse de fluage diminue,

— un stade secondaire *AB* durant lequel le fluage se poursuit à vitesse constante,

— un stade tertiaire, si la contrainte est suffisante : la vitesse augmente alors jusqu'à la rupture. On attribue ce phénomène à la présence de lacunes favorisant le déplacement des dislocations, ce qui explique l'influence de la température.

Pour un accroissement de charge dP et un accroissement de température $d\theta$, si l'on appelle μ le module d'Young à la température considérée, λ le coefficient de dilatation, t le temps et V la vitesse de fluage, l'allongement dl de la longueur l est égal à : $dl = \frac{dP}{\mu} + \lambda d\theta + V dt$.

On étudie généralement l'allongement Δl en fonction du temps, P et θ étant fixés.

Les atomes en solution et les particules dispersées diminuent la vitesse de fluage. Plus un métal a une température de fusion élevée, plus sa vitesse de fluage, toutes choses étant égales par ailleurs, est faible (fig. I-30). Une règle empirique permet de prévoir une vitesse de fluage négligeable si le rapport de la température absolue T de l'essai et de la température absolue de fusion du métal T_F est inférieure à 0,4.

c) *Rupture*. — Lorsque les contraintes appliquées à un échantillon métallique dépassent une valeur déterminée, il y a rupture. On distingue deux types généraux de rupture :

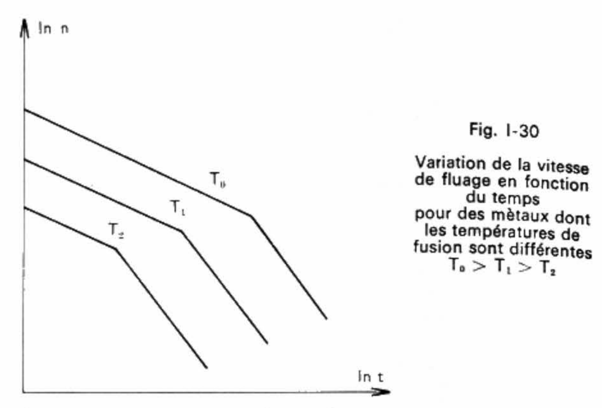


Fig. I-30

Variation de la vitesse de fluage en fonction du temps pour des métaux dont les températures de fusion sont différentes $T_0 > T_1 > T_2$

les ruptures transgranulaires et les ruptures intergranulaires. Dans le cas de la rupture transgranulaire, la charge de rupture théorique est la contrainte nécessaire pour assurer la décohésion de deux parties du cristal selon un plan. Les valeurs trouvées au moyen de ce calcul sont en moyenne 100 fois supérieures aux valeurs expérimentales mesurées pour les monocristaux.

La théorie de Griffith, bien que discutée, rend compte assez fidèlement du phénomène. On considère une rupture en deux temps : apparition de microfissures par suite d'hétérogénéité et de concentration de contraintes puis propagation de celles-ci en fonction de la plasticité du métal en tête de la microfissure. Dans un métal ductile, le bord d'attaque de la microfissure s'arrondit et les contraintes se relâchent, la propagation de la fissure est lente ; dans un métal fragile, la propagation est rapide.

Cela conduit à distinguer deux sortes de ruptures transgranulaires : les ruptures fragiles et les ruptures ductiles. La rupture obtenue est fonction du mode de cristallisation du métal, de la température, de la présence d'impuretés, de la vitesse d'application des contraintes. Dans le cas d'une rupture fragile, il y a décohésion très rapide du métal selon un plan de densité atomique maximale : il y a clivage. Dans le cas d'une rupture ductile, l'application de la contrainte provoque l'apparition de lignes de glissement et la rupture se produit par cisaillement le long de ces lignes, c'est le type de rupture des métaux cristallisant dans le système hexagonal compact ou dans le système cubique à faces centrées. La rupture fragile est dite *rupture à grain;* la rupture ductile est dite *rupture à nerf*. Par ailleurs, il est nécessaire de noter que pour un même métal le type de rupture est fonction de la température (fig. I-31). En effet, on constate que la résilience (travail nécessaire pour rompre un échantillon) d'un métal est fonction de la température : elle est grande et reste sensiblement constante au-dessus d'une certaine température (cela correspond à la zone de rupture ductile) ; ensuite, après une zone de dispersion des valeurs, dite zone de transition, la résilience devient faible (ce domaine de température correspond à la rupture fragile).

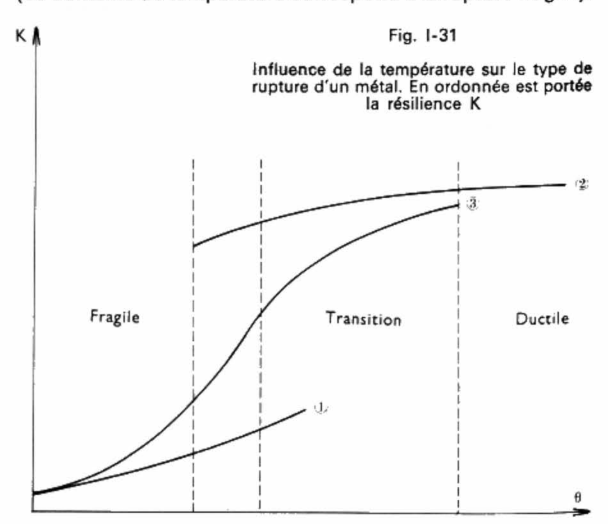


Fig. I-31

Influence de la température sur le type de rupture d'un métal. En ordonnée est portée la résilience K

La température de transition qui correspond au « centre de gravité » de la zone de transition n'est pas une caractéristique intrinsèque du métal car, si elle dépend bien de sa structure, elle est influencée par la présence d'impuretés, par les traitements subis, par l'état de surface (effet d'entaille).

On observe des ruptures intergranulaires lorsqu'une fissuration a suivi les joints de grains, notamment lorsqu'il y a faible cohésion des joints, présence d'une phase fragile ou corrosion des joints de grains ; il s'agit évidemment de ruptures fragiles.

Les métaux cristallisant dans le système hexagonal compact présentent une rupture fragile ou une rupture ductile selon la température ; pour les agrégats polycristallins, la température de transition est supérieure à celle des monocristaux. Les métaux cristallisant dans le système cubique centré présentent une zone de transition où il peut se produire simultanément les deux modes de rupture. Les métaux cristallisant dans le système cubique à faces centrées ne présentent jamais de rupture fragile, étant donné le grand nombre de systèmes de glissement.

d) *Rupture de fatigue.* — Lorsque l'on soumet un métal à des contraintes périodiques simples (traction, compression, flexion, rotation), on constate que, pour des valeurs de contraintes très inférieures à la limite élastique, l'éprouvette se rompt après un certain nombre de cycles. Les contraintes simples sont classées en quatre catégories (fig. I-32).

Dans le cas d'un essai simple de type I en traction-compression, lorsque la vitesse est faible, on obtient un phénomène réversible : la variation d'allongement reste proportionnelle aux efforts. Lorsque la vitesse devient grande, l'éprouvette présente une certaine hystérésis : le cycle prend une forme ellipsoïdale (fig. I-32 a), l'aire de l'ellipse représentant l'énergie dépensée dans l'éprouvette. Une partie de l'énergie est convertie en chaleur, une autre sert à provoquer la création et le déplacement des défauts. Au-dessus d'une certaine contrainte, ces déplacements deviennent irréversibles, la densité et la gravité des défauts croissent avec le nombre de cycles ; lorsque l'accumulation de ces dommages devient suffisante, il y a rupture. Le caractère cumulatif des dommages est mis en évidence par la relation de Miner ; sur une même éprouvette, si l'on applique une contrainte τ_1, qui provoque la rupture au bout de N_1 cycles, durant $\alpha_1 N_1$ cycles ($\alpha_1 < 1$), et ensuite une contrainte τ_2 jusqu'à rupture ($\tau_2 < \tau_1$), l'éprouvette cassera après $\alpha_2 N_2$ cycles ($\alpha_2 < 1$). Expérimentalement on obtient : $\frac{\alpha_1 N_1}{N_1} + \frac{\alpha_2 N_2}{N_2} = 1$; cela permet de prévoir le nombre de cycles avant la rupture à partir d'un essai (fig. I-33). On explique

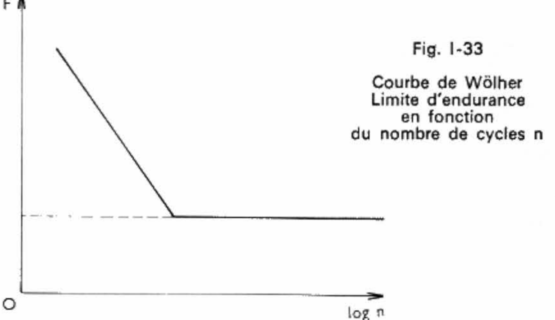
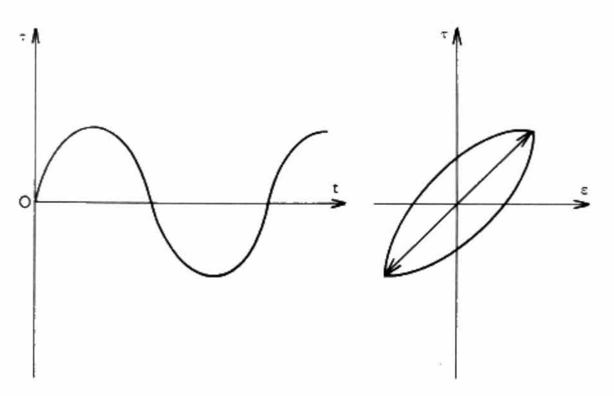
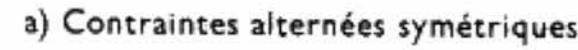


Fig. I-33

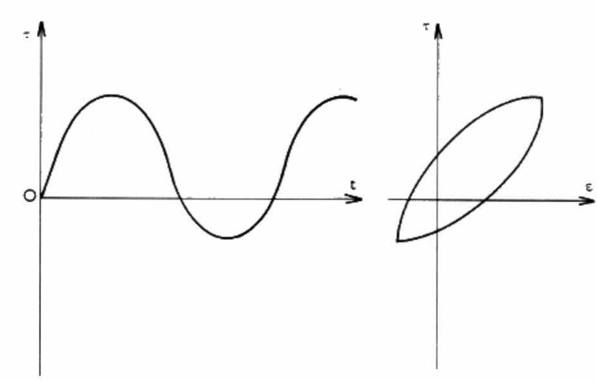
Courbe de Wölher
Limite d'endurance
en fonction
du nombre de cycles n

ce résultat en admettant qu'une source de dislocations entre en action sous l'effet de la contrainte et que, en l'absence de réversibilité du phénomène due à l'accumulation des dommages, la dislocation produite donne naissance à une marche *M*. Cette marche est favorable à une amorce de fissure. De plus, l'inversion des contraintes provoque un retour partiel de la dislocation et un changement de plan grâce à une composante « vis » ; au cycle suivant elle donnera une marche *M'*. Il y aura alors création et propagation de fissure. Par des essais systématiques, on peut déterminer le nombre de cycles avant rupture en fonction de l'intensité de la contrainte ; le graphe obtenu est appelé *courbe de Wölher* (V. fig. I-33). On constate que la durée de vie croît en fonction inverse de la contrainte ; pour certains métaux ou alliages, au-dessous d'une certaine contrainte critique (limite d'endurance), on n'observe plus de rupture quel que soit le nombre de cycles. La limite d'endurance est fonction de la nature et de la loi de sollicitation, de la structure et des



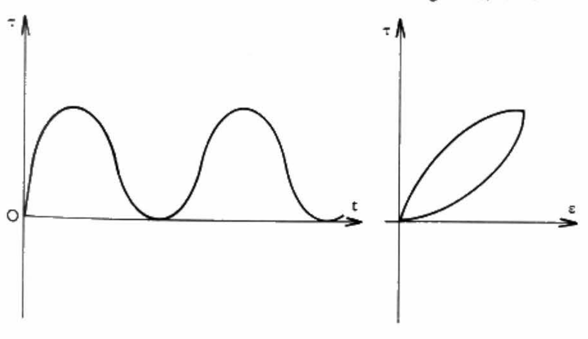


a) Contraintes alternées symétriques

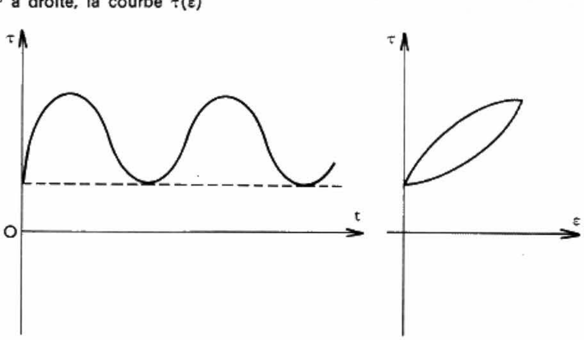


b) Contraintes alternées dissymétriques

Fig. I-32 — Classification des sollicitations simples : Pour chaque type de contrainte on a représenté : 1° à gauche, la courbe $\tau(t)$; 2° à droite, la courbe $\tau(\varepsilon)$



c) Contraintes répétées



d) Contraintes ondulées

traitements, de l'effet d'alliage (la limite d'endurance croît avec la concentration en soluté), de l'état de surface qui a une importance capitale pour les essais de fatigue. La rupture de fatigue présente un facies particulier: elle commence fréquemment en surface à partir d'un défaut et il y a progression lente de la fissure avec matage du métal par chocs répétés des lèvres de la fissure. Lorsque la section devient inférieure à celle correspondant à la charge de rupture, il y a cassure à grain (la rupture par fatigue a lieu sans striction).

2.2. Théorie électronique des métaux

2.2.1. Théorie de l'électron libre. — La théorie de Drude-Lorentz postule, en première approximation, qu'un cristal métallique est constitué d'un réseau de sphères rigides (ions positifs), « cimenté par un gaz électronique ». (V. ci-dessus, § 1.3). On considère que les électrons constituant ce gaz peuvent se déplacer librement dans les limites d'un cristal métallique; de plus, on suppose que le potentiel augmente brusquement à ces limites et qu'à l'extérieur l'énergie potentielle de l'électron devient constante. Dans cette hypothèse, on admet que l'électron se déplace librement dans une « boîte de potentiel » et qu'il est repoussé par les « parois » tant que son énergie cinétique n'est pas suffisante pour lui permettre de franchir ces barrières de potentiel. En considérant les phénomènes dans un tel champ uniforme, il est déjà possible d'en effectuer une première analyse (fig. I-34).

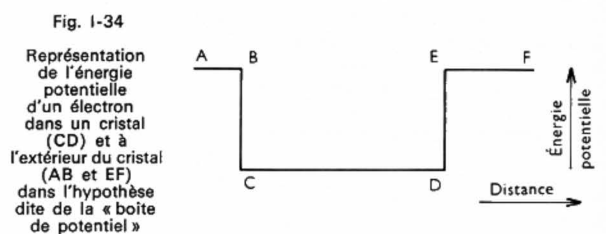


Fig. I-34

Représentation de l'énergie potentielle d'un électron dans un cristal (CD) et à l'extérieur du cristal (AB et EF) dans l'hypothèse dite de la « boîte de potentiel »

On sait qu'à tout électron de masse m et de vitesse v on peut associer une longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{mv}$; h désignant la constante de Planck ($h = 6{,}625 \times 10^{-34}$ J.s), et une grandeur vectorielle, le *nombre d'ondes* dont le module k est tel que : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Pour un électron libre, l'énergie potentielle est constante et on peut supposer qu'elle est nulle. L'énergie de l'électron libre est donc uniquement fonction de son énergie cinétique. Si l'on considère uniquement l'hypothèse de l'électron libre, l'énergie cinétique est une fonction parabolique du nombre d'ondes (fig. I-35) :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{h^2}{2\,m\lambda^2} = \frac{h^2k^2}{8\pi^2 m}$$

Cependant, les électrons étant porteurs de charges, ils ne sont parfaitement libres que dans un champ électrostatique uniforme. Dans un cristal métallique, la présence d'ions positifs provoque la création d'un champ électrostatique périodique (fig. I-36).

Le concept de l'électron libre dans un champ uniforme permet de rendre compte de l'opacité et du grand pouvoir

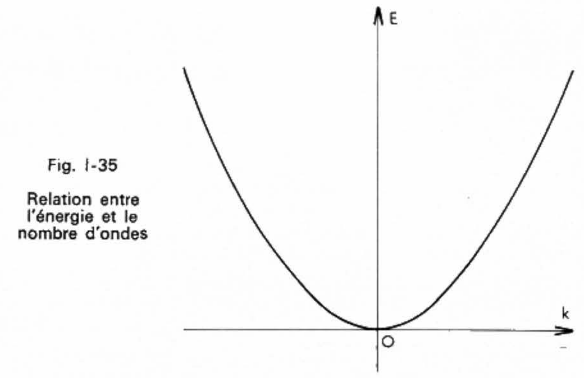


Fig. I-35

Relation entre l'énergie et le nombre d'ondes

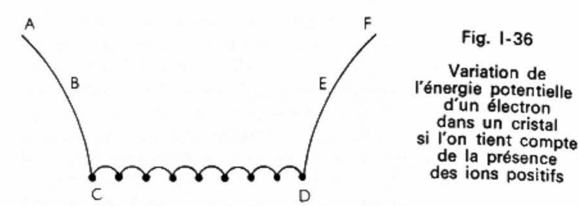


Fig. I-36

Variation de l'énergie potentielle d'un électron dans un cristal si l'on tient compte de la présence des ions positifs

réflecteur des métaux. En effet, dans un métal les électrons libres peuvent absorber les énergies associées à toutes les longueurs d'onde du domaine visible: cela explique que le métal soit opaque. De plus, un électron recevant de l'énergie lumineuse est passé à un niveau énergétique inférieur et, afin de maintenir la loi de la conservation de l'énergie, ce processus s'accompagne de l'émission d'un rayonnement. C'est ainsi qu'un faisceau lumineux frappant une surface métallique donne naissance à un faisceau réfléchi intense caractéristique de l'éclat métallique. À l'exception de ces considérations, la théorie ainsi énoncée est trop sommaire pour rendre compte de la chaleur massique des métaux et de la variation de la conductibilité électrique avec la température. L'introduction de la mécanique ondulatoire a permis de rendre compte de la faible chaleur massique du gaz d'électrons libres.

Dans une « boîte de potentiel » de longueur L (fig. I-37), on ne peut trouver qu'un nombre entier de demi-longueurs d'onde afin que les nœuds se trouvent aux limites de la « boîte »; les longueurs d'onde permises sont donc: $\lambda = 2L, \frac{2L}{2}, \frac{2L}{3}, \ldots, \frac{2L}{n}$. Puisque l'énergie cinétique est liée à la longueur d'onde, pour un électron libre dans un métal il ne peut y avoir qu'un nombre discret de niveaux. Les valeurs possibles de E sont égales à :

— pour un réseau unidimensionnel $E = \frac{n^2h^2}{8mL^2}$, n étant un nombre entier ($n = 1, 2, 3, \ldots$)

— pour un réseau tridimensionnel, n_x, n_y et n_z étant des nombres entiers : $E = \frac{h^2}{8mL^2}(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$

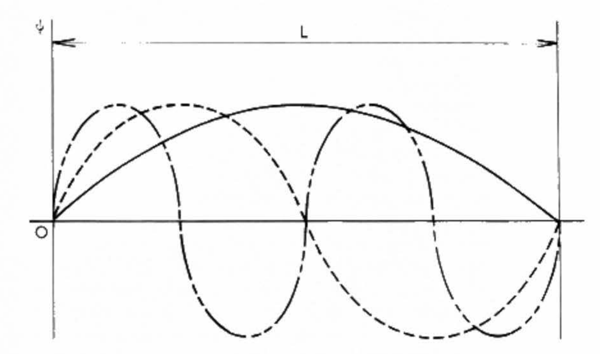


Fig. I-37 — Ondes probables dans une boîte de potentiel de longueur L

Les valeurs des niveaux d'énergie effectivement occupés dépendent de la température.

À 0 K, les électrons occupent les niveaux correspondant aux énergies les plus faibles; comme il ne peut y avoir que 2 électrons par niveau (principe d'exclusion de Pauli), s'il y a N électrons libres dans un métal, ils occuperont les $\frac{N}{2}$ états quantiques de plus faible énergie. Ainsi à 0 K, tous les niveaux jusqu'à une certaine valeur E_{max} sont complètement occupés et les autres sont complètement vides:

$$E_{max} = \frac{h^2}{8m}\left(\frac{3N}{\pi L^3}\right)^{2/3}$$

E_{max} ne dépend que de $\frac{N}{L^2}$, c'est-à-dire du nombre d'électrons libres par unité de volume de métal. On en tire la valeur de la plus petite longueur d'onde qui puisse être associée à un électron dans le cristal de volume $V = L^3$:

$$\lambda_{min} = 2\left(\frac{\pi V}{3N}\right)^{1/3}$$

Si on élève la température T d'un métal, une partie des électrons absorbe l'énergie thermique et se trouve portée à des états quantiques supérieurs ; comme un électron ne peut passer que dans un état quantique vacant (principe d'exclusion de Pauli) tous les électrons dont l'énergie est égale à $(E_{max} - kT)$ sont excités thermiquement : ils doivent et peuvent passer dans des états énergétiques supérieurs à E_{max} (k étant la constante de Boltzmann). Comme à température ambiante $E_{max} \approx 100\ kT$, seule une faible fraction des électrons libres absorbe de l'énergie thermique. Il en résulte que la chaleur massique du gaz électronique est très faible et que la courbe de distribution de Fermi est peu modifiée par rapport à sa configuration à 0 K.

2.2.2. Théorie des zones. — Les considérations précédentes ont été établies en fonction du comportement de l'électron libre dans un champ uniforme. Si l'on tient compte du champ périodique créé par la présence des ions positifs, la fonction $E = f(k)$ est interrompue pour certaines valeurs de k. En effet, dans ces conditions, pour une direction donnée de mouvement de l'électron par rapport à un système de plans cristallins, il existe des positions pour lesquelles ces plans satisfont la loi de Bragg pour l'onde associée à l'électron : $n\lambda = 2d \sin\theta$ (fig. I-38). Comme $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, les valeurs critiques de k sont données par l'expression suivante :

$$k = \frac{n\pi}{d \sin\theta}$$

Par conséquent, pour une direction donnée de mouvement par rapport à un système de plans réflecteurs, il existe

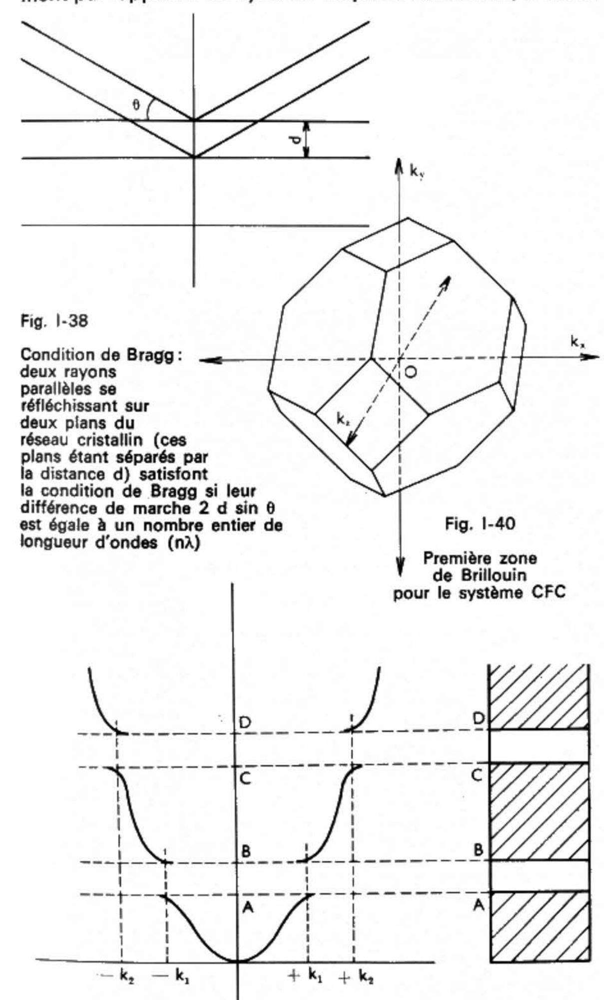


Fig. I-38

Condition de Bragg : deux rayons parallèles se réfléchissant sur deux plans du réseau cristallin (ces plans étant séparés par la distance d) satisfont la condition de Bragg si leur différence de marche 2 d sin θ est égale à un nombre entier de longueur d'ondes (nλ)

Fig. I-40

Première zone de Brillouin pour le système CFC

Fig. I-39 — Variation de l'énergie totale en fonction du nombre d'ondes pour un cristal présentant un champ périodique

des énergies interdites ; leurs valeurs correspondent à celles qui satisfont à la loi de Bragg pour le système de plans car, dans ce cas, les électrons sont réfléchis (fig. I-39).

Dans les cristaux d'éléments de valence faible, les forces électrostatiques entre les électrons et les ions sont faibles : les domaines définis par les discontinuités sont étroits. Ils sont plus larges pour des cristaux constitués d'éléments de valence plus élevée.

Les zones d'énergie permises pour les électrons sont appelées *zones de Brillouin*. Dans le cas d'un cristal métallique à trois dimensions, les zones de Brillouin sont des polyèdres dont les faces sont parallèles aux plans réflecteurs appropriés du cristal, et dont les contours d'énergie sont des surfaces dans l'espace K (fig. I-40), espace mathématique défini par trois nombres d'onde k_x, k_y, k_z. Leurs premières valeurs sont égales à $k_{xyz} = \pm \frac{\pi}{a}$ (a est le paramètre de la maille). Le cube défini par ces trois premiers nombres constitue la limite de la première zone de Brillouin. Les zones peuvent ou non se recouvrir, le deuxième cas est celui des métaux. Les zones ne se remplissent pas de la même façon selon les métaux considérés. Pour les métaux monovalents comme les métaux alcalins, seuls les états quantiques de plus faible énergie sont occupés de telle sorte que la première zone de Brillouin est à moitié remplie. Pour les éléments de valence supérieure, le mode d'occupation des zones de Brillouin varie selon qu'elles se recouvrent ou non. Lorsque deux zones se recouvrent (cas des métaux), les électrons commencent à occuper les niveaux d'énergie les plus bas de la seconde zone avant que la première ne soit complètement remplie (fig. I-41). Ces constatations permettent une définition nouvelle et plus complète de l'état métallique : un élément est un *métal* lorsqu'il existe des *zones comportant des niveaux énergétiques vacants associées à la structure cristalline.*

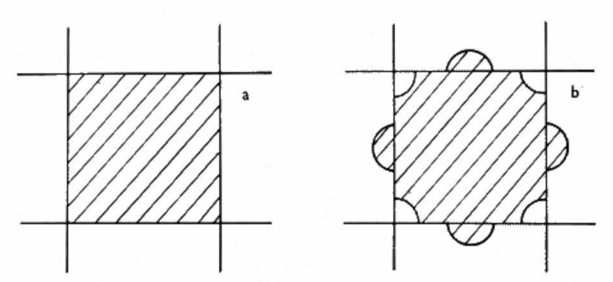


Fig. I-41 — Occupation des zones de Brillouin
a) zones ne se recoupant pas
b) zones se recoupant

2.2.3. Applications. — Il est ainsi possible d'expliquer certaines propriétés des métaux.

1° *Conductibilité électrique.* — Lorsqu'on applique un champ électrique aux électrons formant le nuage électronique, ceux-ci se trouvent accélérés dans la direction du champ (et dans le sens contraire de celui-ci). Pour un champ déterminé, l'intensité du courant a une valeur constante ; il s'établit un état d'équilibre sous l'effet d'une résistance à la propagation des électrons à travers le cristal. Si l'on observe la variation de la résistivité d'un métal, on peut tracer la courbe de la figure I-42. Pour des températures

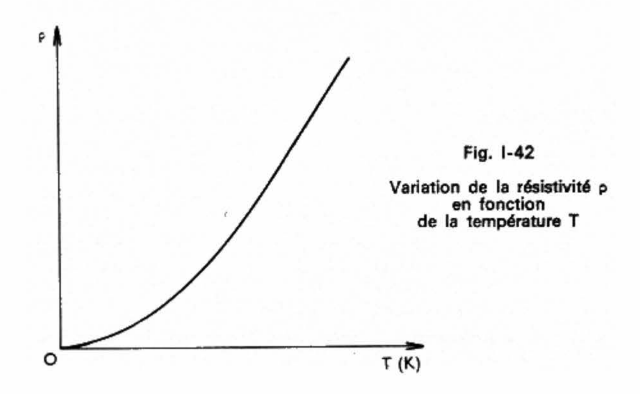


Fig. I-42

Variation de la résistivité ρ en fonction de la température T

supérieures à une valeur T_c, la résistivité varie linéairement avec la température selon la relation : $\rho = \rho_0 (1 + \alpha T)$. Pour des valeurs inférieures à T_c, la variation est proportionnelle à T^5 et ρ devient nul à 0 K (supraconductivité) ; dans certains cas cependant on peut observer une résistivité résiduelle.

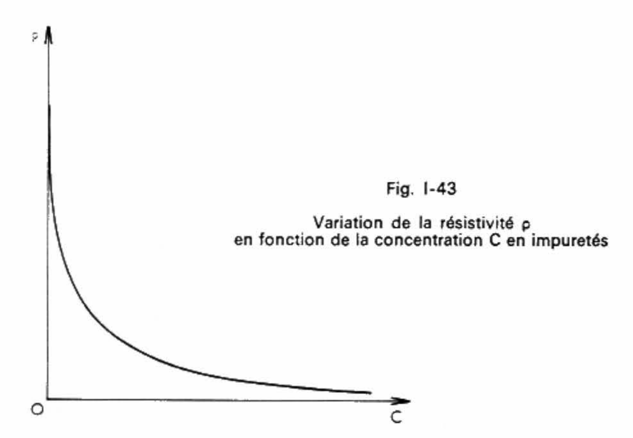


Fig. I-43

Variation de la résistivité ρ en fonction de la concentration C en impuretés

On ne peut expliquer tous les phénomènes observés à propos de la résistance électrique en considérant le choc des électrons sur les ions du réseau ; toutefois, la théorie précédemment évoquée permet de préciser certains d'entre eux. Ainsi la résistance semble due à une diffusion générale des ondes associées, diffusion provoquée par les ions du réseau irrégulièrement répartis, ce qui fait que les ondes individuelles diffusées par chaque atome ne peuvent interférer utilement. Un réseau périodique parfait ne présente pas de résistance. Aux très basses températures, le réseau peut être parfait et la résistance est nulle (phénomène de supraconductivité). Aux basses températures la résistance est faible. Lorsque la température augmente, le désordre devient plus grand sous l'effet de l'agitation thermique, et la résistance croît. Toutes irrégularités du réseau provoquent également une augmentation de la résistance. Ainsi la présence d'impuretés (fig. I-43), de défauts cristallins (lacunes, dislocations ; fig. I-44) augmente la résistance de façon notable, et ne permet plus d'obtenir une résistivité nulle à 0 K (résistivité résiduelle). Cette propriété est tellement sensible à ces perturbations qu'elle permet de détecter de très faibles quantités d'impuretés (de l'ordre de la partie par million) en solution dans les métaux purs, ou de déterminer les très faibles perturbations mécaniques du réseau.

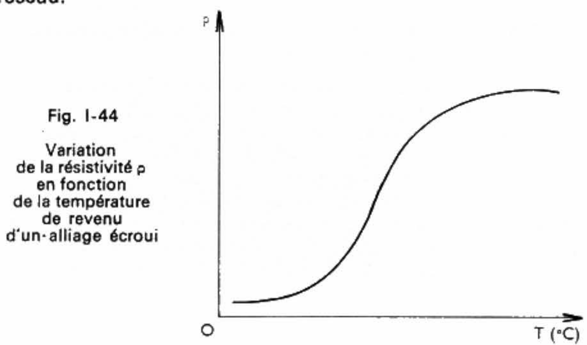


Fig. I-44

Variation de la résistivité ρ en fonction de la température de revenu d'un alliage écroui

Si l'on compare la conductibilité de différents métaux à égalité d'amplitude de l'agitation thermique, on constate que la conductibilité est d'autant plus faible que la valence est plus grande (les métaux de transition font exception). Cette constatation paradoxale s'explique aisément au moyen de la théorie des zones. Lorsqu'une zone est presque vide d'électrons, la conductibilité est faible, car il existe très peu d'électrons pour transporter le courant. Lorsqu'une zone est à moitié remplie, la conductibilité est élevée car tous les électrons peuvent prendre une énergie supérieure et participer au transport du courant (c'est le cas des métaux monovalents). Lorsqu'une zone est à peu près complètement remplie, le nombre d'électrons participant au transport de charge est faible (le nombre de niveaux disponibles étant petit), et la conductibilité est faible (c'est le cas des métaux alcalino-terreux divalents). Dans le cas des métaux de transition, la conductibilité est également faible mais pour des raisons différentes : les métaux de transition sont caractérisés par une haute densité d'états quantiques partiellement remplis pour les bandes *d* (V. t. 1, Physique nucléaire, chap. 1). Or, lorsqu'un électron est dévié par une irrégularité du réseau, il passe dans un nouvel état quantique, et la probabilité de déviation est d'autant plus grande qu'il existe d'états quantiques disponibles. Dans les métaux de transition, le nombre d'électrons déviés est donc important, et par conséquent la résistivité est élevée.

2° *Le magnétisme.* — Outre son application à la théorie des zones, la théorie électronique des métaux a pu être utilisée pour l'explication d'autres phénomènes et notamment le magnétisme (V. t. 1, Magnétisme, chap. 2).

Lorsqu'un métal est placé dans un champ magnétique, il s'exerce sur lui une certaine force. Le rapport de cette force au champ magnétique dépend de la susceptibilité magnétique χ. On distingue trois catégories de substances :

— *Les substances diamagnétiques :* χ est petit et négatif, les échantillons sont repoussés faiblement par l'aimant ; c'est pour les métaux le cas de Cu, Ag, Au, Bi.

— *Les substances paramagnétiques :* χ est petit et positif, les échantillons sont attirés faiblement par l'aimant ; pour les métaux c'est le cas des métaux alcalins et alcalino-terreux et les métaux de transition non ferromagnétiques.

— *Les substances ferromagnétiques :* χ est grand et positif, les échantillons sont attirés fortement par l'aimant. On ne connaît que cinq métaux ferromagnétiques : Fe, Co, Ni, Gd et Dy.

Dans la plupart des métaux, les conditions de ferromagnétisme ne sont pas remplies sauf pour les métaux de transition. Ceux-ci sont fortement paramagnétiques ou ferromagnétiques comme ceux du groupe de fer où le ferromagnétisme est associé au niveau 3 *d*.

Pour les éléments ferromagnétiques, sauf cas particulier (aimants), il n'y a pas d'aimantation rémanente apparente car, afin que l'énergie interne du système soit minimale, les spins s'orientent dans une même direction à l'intérieur de domaines (domaines de Weiss, figure 1-45), les domaines se groupant de telle sorte que le champ résultant

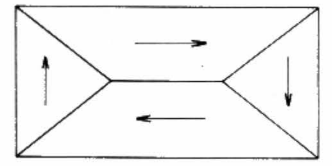


Fig. I-45

Domaines de Weiss

soit nul. Les domaines sont de très petites dimensions, et chaque grain du métal en comporte plusieurs. Un champ magnétique extérieur permet aux domaines orientés favorablement de croître aux dépens des autres par déplacement de leurs limites (on oriente favorablement les domaines mal orientés). Si on entrave le déplacement des limites des domaines (présence de dislocations, autre élément en solution solide, précipités très fins et nombreux, grande quantité de joints de grain), l'aimantation pour un champ agissant donné et l'aimantation à saturation seront d'autant plus faibles que les limites seront plus difficiles à déplacer. En revanche, lorsqu'on supprimera le champ agissant il subsistera une certaine aimantation rémanente, les limites ne pouvant revenir spontanément à l'équilibre ; pour ce faire il sera nécessaire d'appliquer un champ inverse d'une certaine intensité dit champ coercitif.

Il existe des relations d'orientation entre les domaines et le cristal ; ainsi les directions de facile aimantation (aimantation à saturation atteinte avec des champs agissant les plus faibles) sont les directions $< 1.0.0. >$ pour le fer et $< 1.1.1 >$ pour le nickel. Toutes choses étant égales par ailleurs, l'aimantation à saturation diminue avec la température jusqu'à une température critique dite « point de Curie ». En effet, l'élévation de température augmente le degré de désordre des spins ; à mesure que le désordre

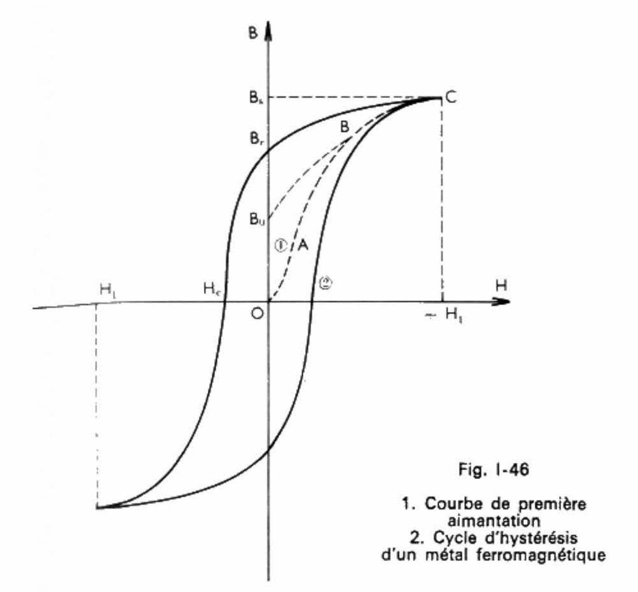


Fig. I-46

1. Courbe de première aimantation
2. Cycle d'hystérésis d'un métal ferromagnétique

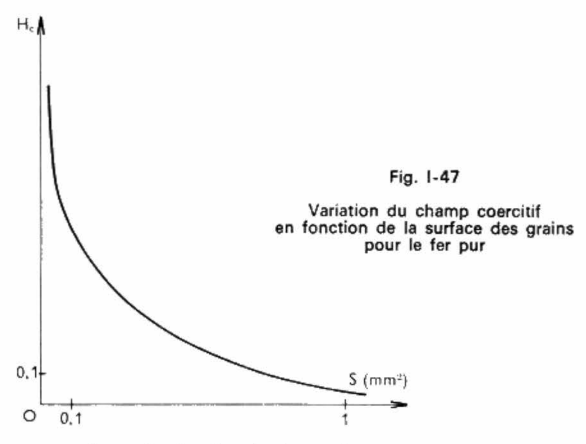


Fig. I-47

Variation du champ coercitif en fonction de la surface des grains pour le fer pur

croît l'énergie nécessaire pour renverser le spin d'un électron diminue jusqu'à devenir négligeable, la température qui correspond à ce désordre généralisé est la température de Curie.

Une observation macroscopique des phénomènes peut être faite à la lumière des théories précédentes. La figure 1-46 montre la variation de l'aimantation *H* en fonction du champ *B* lors de la première aimantation, on remarque trois parties :

— Une période de variation rectiligne *OA* pendant laquelle l'aimantation s'effectue par perturbation des domaines de Weiss dont les parties favorablement orientées vont croître aux dépens des autres. Durant cette période, le phénomène est réversible ; si l'on supprime le champ, l'aimantation disparaît.

— Une période de variation non rapide non rectiligne *AB*. Chacun des domaines de Weiss est totalement orienté et leurs parois se déplacent en franchissant certains défauts du cristal (précipités, inclusions). Lorsqu'on annule le champ à cause de ces défauts, les parois des domaines ne peuvent reprendre leurs positions initiales, et il reste une aimantation résiduelle B_s.

— Une période de variation lente non linéaire pendant laquelle les directions d'aimantation des domaines, qui étaient jusque-là parallèles aux directions de facile aimantation, vont tourner pour devenir parallèles au champ inducteur. Cette phase est terminée lorsqu'on atteint l'aimantation à saturation B_0.

Si l'on soumet l'échantillon à un champ cyclique compris entre + et — H_1, on remarque que l'aimentation décrit un cycle appelé *cycle d'hystérésis ;* pour un champ nul on observe une aimantation B_r qui est l'aimantation rémanente ; pour désaimanter le barreau, il faut lui appliquer le champ coercitif H_c afin de permettre aux limites des domaines de Weiss de refranchir les imperfections qu'elles avaient déjà traversées lors de la première aimantation.

Il en résulte des conséquences pratiques pour l'utilisation des matériaux ferromagnétiques. Si l'on désire utiliser des matériaux magnétiques doux avec un grand nombre de cycles d'hystérésis par unité de temps (tôle de transformateur), on a intérêt à avoir une forte perméabilité magnétique afin d'avoir une forte induction pour un faible champ ; il est donc souhaitable de provoquer une texture où les directions de facile aimantation sont parallèles au champ inducteur. Pour que les pertes par hystérésis soient faibles, la surface du cycle d'hystérésis doit être la plus faible possible ; il faut donc diminuer la valeur du champ coercitif en utilisant des matériaux présentant le moins de perturbations possibles, en particulier en diminuant le nombre de joints de grain.

La figure 1-47 montre la variation du champ coercitif en fonction de la surface des joints de grain ; on voit que pour une surface de l'ordre de 1 mm² avec du fer pur, H_c est pratiquement nul. À l'inverse, si l'on désire des matériaux possédant une aimantation stable, un fort champ coercitif et une forte aimantation rémanente (aimants permanents), on cherchera à obtenir des grains ne contenant qu'un seul domaine (2.10^{-6} cm pour le fer) ; pour cette dimension, le champ coercitif sera maximal. À cet effet on fera apparaître dans le métal des tensions internes, des précipités, ou une seconde phase, afin de bloquer le déplacement des domaines.

2.3. Comportement thermique des métaux

2.3.1. Rappels de thermodynamique et de cinétique appliquées à la métallurgie

1° *Les fonctions d'état.* — Il existe cinq fonctions d'état qui permettent de définir l'énergie et la variation d'énergie des systèmes au cours des transformations, et de prévoir ces transformations : une fonction d'état caractérise un état donné. La variation entre deux valeurs d'une fonction d'état ne dépend pas de la façon dont se fait le passage de l'une à l'autre, mais seulement de l'état final et de l'état initial. Les fonctions d'état sont (V. t. 1, Thermodynamique, chap. 5) :

— *L'énergie interne U* qui représente l'énergie totale d'un système c'est-à-dire la somme de toutes les énergies, potentielles et cinétiques, de tous les atomes du système. Dans un système totalement isolé des systèmes voisins, l'énergie totale reste constante mais s'il reçoit de ses voisins une quantité élémentaire de chaleur *dq* et s'il leur fournit un travail élémentaire *dw*, son énergie interne variera de la quantité $dU = dq + dw$.

À pression constante le travail élémentaire *dw* sera égal au produit de la variation de volume *dV* par la pression (le travail étant fourni par le système), la relation sera négative et on écrira : $dw = - pdV$ d'où $dU = dq - pdV$.

À volume constant (aucun travail n'est fourni) $dq = dU$; or *dq* est le produit de la capacité calorifique à volume constant c_v par la variation élémentaire de température *dT*, soit $dq = c_v dT$. D'où $c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$, et l'on tire l'énergie interne d'un corps à volume et température donnés ; $U_{VT} = U_0 + \int_0^T c_v dT$; U_0 représentant l'énergie interne de référence.

— *L'entropie S* : il est difficile de concevoir simplement la nature de l'entropie car elle n'est pas directement perceptible. C'est une propriété de capacité du système, c'est-à-dire liée à la quantité de matière du système, qui définit la probabilité d'existence de l'état considéré. L'entropie peut être définie par deux voies différentes :

● La mécanique statistique permet de prévoir les propriétés macroscopiques moyennes d'un système par l'application des méthodes statistiques à ses constituants élémentaires. Pour un état thermodynamique déterminé il existe un très grand nombre d'états élémentaires ou *complexions*. Leur nombre *p* peut être calculé au moyen de la mécanique statistique ; *p* s'appelle la probabilité de l'état considéré. L'entropie *S* est liée à la probabilité d'état par la

relation de Boltzmann (k étant la constante de Boltzmann) : $S = k \ln p$.

• En thermodynamique, on suppose qu'un système subit une transformation élémentaire réversible en absorbant une quantité de chaleur dQ à la température T ; son entropie s'accroît d'une quantité $dS = \frac{dQ}{T}$. Lorsqu'on passe d'un état d'équilibre 1 à un état d'équilibre 2, la variation d'entropie est égale à : $S_2 - S_1 = \Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$.
À pression constante $dQ = c_p dT$ et à 0 K l'entropie est nulle, par conséquent : $S_{pT} = \int_0^T \frac{c_p}{T} dT$.

L'entropie permet de mesurer le désordre d'un état ; un système n'est thermodynamiquement stable que lorsqu'il a atteint l'entropie maximale. Il ne peut évoluer spontanément (sans apport d'énergie) que si son entropie augmente.

— *L'énergie libre F* : c'est l'énergie d'un système qui est disponible pour effectuer une transformation :

$$F = U - TS$$

Cette énergie dite encore énergie libre de Helmholtz correspond à l'énergie qui était disponible dans le système dans l'état considéré. Un système est en équilibre lorsque son énergie libre est minimale.

— *L'enthalpie H* correspond à la quantité totale d'énergie du système caractéristique d'un certain état lorsque la pression reste constante : c'est la somme de l'énergie interne et du travail fourni par le système :

$$H = U + pV$$

à une température T et à une pression p déterminées :

$$H_{Tp} = H_0 + \int_0^T c_p \, d\,T$$

La différence d'enthalpie ΔH entre un état 1 et un état 2 correspond à la chaleur de réaction c'est-à-dire à la quantité de chaleur libérée par une réaction lorsque celle-ci est exothermique ($\Delta H < 0$), ou absorbée lorsqu'elle est endothermique ($\Delta H < 0$). Par analogie, on pourrait qualifier l'enthalpie de « chaleur interne » d'un système. Une transformation endothermique, provoquant une élévation de la chaleur interne, nécessite un apport d'énergie ; une transformation exothermique, entraînant un abaissement de la chaleur interne, provoque une libération d'énergie. Les enthalpies de réaction sont additives.

— *L'enthalpie libre G*, par analogie avec l'énergie libre, est la quantité d'énergie calorifique disponible pour une réaction à pression constante ; elle est par conséquent égale à la quantité de chaleur disponible diminuée de la quantité de chaleur représentée par l'état entropique du système : $G = H - TS$. La connaissance de G permet de prévoir les réactions.

La figure I-48 montre l'allure de ces courbes. On constate qu'à 0 K l'enthalpie et l'enthalpie libre sont identiques ; ce qui est normal, l'entropie étant nulle, puis les valeurs divergent à mesure que la température croît.

En métallurgie, les fonctions d'état peuvent s'appliquer aux phénomènes suivants : réactions chimiques rencontrées lors de l'élaboration, comportement thermique des métaux purs, constitution et propriétés des alliages. Ces applications spécifiques seront développées dans chacun des chapitres consacrés à ces propriétés particulières.

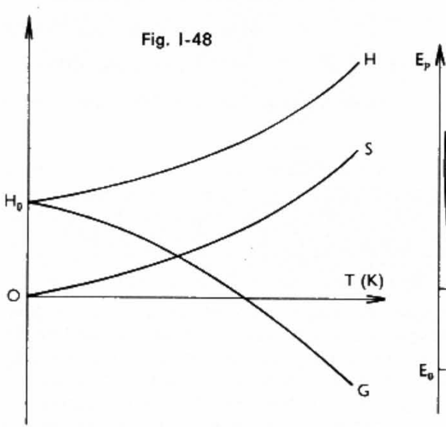
2° *Chaleur massique et dilatation thermique.* — Dans un édifice cristallin, les ions ou les atomes ne sont pas fixes : ils vibrent autour de positions qui correspondent aux nœuds du réseau. Lorsqu'on augmente la température d'un cristal, on augmente l'amplitude de cette vibration. Par suite, l'énergie interne du cristal croît, puisque l'énergie cinétique et l'énergie potentielle des atomes augmentent. La chaleur massique (ou capacité calorifique) d'un cristal est la proportion d'énergie vibratoire qu'il absorbe lorsqu'on élève sa température d'un degré Celsius (ou un kelvin). En outre, il se produit une dilatation du cristal, due au fait que l'énergie potentielle des atomes augmente plus vite lorsqu'ils se rapprochent que lorsqu'ils s'écartent (fig. I-49). Par conséquent, lorsque deux atomes vibrent au voisinage l'un de l'autre, ils ne se rapprochent pas sensiblement au-dessous de leur distance d'équilibre, correspondant au minimum de la courbe d'énergie potentielle ; en revanche, ils s'écartent plus fortement l'un de l'autre lorsqu'ils s'éloignent. Ainsi, sous l'effet d'une augmentation de température qui accroît l'amplitude des vibrations, les distances interréticulaires augmentent.

Remarque. — Une règle empirique, la *loi de Neumann et Kopp*, permet de calculer la valeur de c_p pour les composés chimiques à partir de la capacité calorifique à pression constante de chacun des constituants ; ainsi, pour un composé formé de x parties de A et de y parties de B de formule A_xB_y, on aura : $c_p\,(A_xB_y) = xc_{pA} + yc_{pB}$.

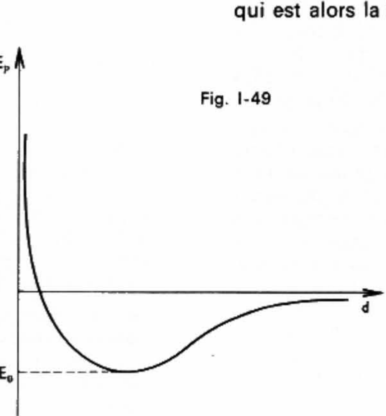
2.3.2. Transformations allotropiques. — On appelle transformation allotropique un changement de structure du réseau cristallin, c'est-à-dire une modification du mode d'arrangement des ions dans le cristal. Pour certains éléments, une structure déterminée, possédant l'énergie libre minimale, n'est stable que jusqu'à une certaine température ; au-dessus de celle-ci, le système possédant l'énergie libre minimale est différent. C'est, par exemple, le cas du fer qui cristallise dans le système cubique centré (fer α) jusqu'à 910 °C, puis dans le système cubique à faces centrées entre 910 °C et 1 425 °C, et reprend la forme cubique centrée entre cette température et sa température de fusion (1 535 °C).

L'examen de la variation de l'énergie libre en fonction de la température permet de rendre compte du phénomène.

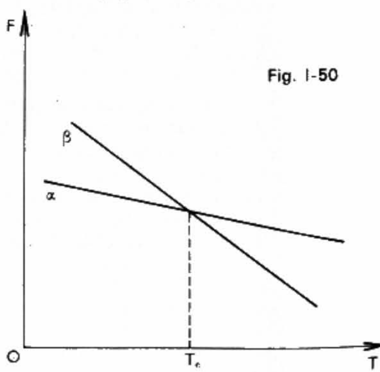
On montre que l'énergie libre F diminue lorsque la température croît, d'autant plus rapidement que la chaleur massique de la forme allotropique considérée est grande. Par conséquent, pour un métal présentant deux formes allotropiques différentes α et β et si α possède l'énergie interne U_0 et la chaleur massique les plus basses, cette forme est stable à basse température ; si la température s'élève suffisamment, F_α devient supérieur à F_β, et c'est cette phase qui est alors la forme stable (fig. I-50).



Variation de l'entropie, de l'enthalpie et de l'enthalpie libre en fonction de la température



Variation de l'énergie potentielle en fonction de la distance d entre atomes



Variation de l'énergie libre des formes allotropiques α et β en fonction de la température ; détermination de la température T_c correspondant à la transformation allotropique

Les transformations allotropiques se produisent par germination et croissance. Lorsque la température de transition est atteinte, les fluctuations de distribution de l'énergie thermique provoquent l'apparition de petits groupes d'atomes dont l'énergie est suffisante pour former de petits germes de la structure nouvelle. Ces germes se développent ensuite aux dépens de l'ancienne structure jusqu'à transformation complète. Cette transformation a lieu à température constante : il s'agit d'une transformation isotherme. Cette propriété découle de façon évidente du mode de transformation : en effet, tant que celle-ci n'est pas terminée, il ne peut y avoir d'augmentation de température, puisque, seule, la phase β peut exister pour des valeurs supérieures de celle-ci alors qu'il subsiste de la phase α. Durant cette période, tout nouvel apport d'énergie calorifique permet seulement d'accélérer le phénomène. Les réarrangements atomiques qui se produisent durant la transformation sont accompagnés de modification des dimensions de la maille (la fraction de maille occupée par un atome dans le système cubique à faces centrées est inférieure d'environ 8 % à celle qu'il occuperait dans le système cubique centré). Ces variations de volume ne peuvent se produire librement, par suite de la rigidité de la matrice de l'ancienne phase, de telle sorte que la transformation est accompagnée de tensions et de déformations internes. L'énergie de déformation, s'ajoutant à l'énergie libre du système, tend à s'opposer à la transformation.

2.3.3. Transformations magnétiques. — L'arrangement stable dans un domaine de Weiss d'un métal ferromagnétique (V. t. 1, Magnétisme, chap. 2), ne possède l'énergie interne minimale qu'à basse température, car cet état très ordonné correspond à l'entropie minimale également. Mais d'autres états, dans lesquels des moments magnétiques deviennent opposés, peuvent devenir stables à des températures plus élevées. À basse température, cette aimantation à saturation concorde avec celle qui correspond à l'alignement de tous les moments magnétiques ; lorsque la température augmente, sa valeur diminue d'abord lentement puis de plus en plus rapidement jusqu'à une température critique T_c, dite température de Curie, au-dessus de laquelle le matériau perd totalement son ferromagnétisme et devient paramagnétique. Cette température est égale à 780 °C pour le fer, 1 075 °C pour le cobalt, 365 °C pour le nickel.

À cette température le désordre est général et l'on démontre qu'une moitié des moments magnétiques est orientée dans un sens et l'autre moitié dans le sens opposé. À basse température, du fait de l'action des atomes voisins, il faut une énergie relativement importante pour renverser le champ résultant d'un atome. Lorsque la température s'élève, un nombre croissant de directions ayant été renversé, les interactions entre atomes voisins deviennent moins grandes et l'énergie nécessaire est de plus en plus faible jusqu'à la température T_c où un apport d'énergie négligeable est suffisant pour établir un désordre généralisé.

2.3.4. Comportement thermique des défauts cristallins. — On sait qu'outre les défauts linéaires, il peut exister des imperfections telles que des positions atomiques vacantes (lacunes ou défauts de Schottky), ou des atomes réinsérés dans le réseau (défauts de Frenkel) (fig. I-51 et I-52).

Un cristal étant en équilibre lorsque son énergie libre $F = U - TS$ est minimale, à 0 K ($F = U$) l'état stable correspond à un arrangement cristallin parfait. Lorsque la température croît le terme entropique (TS) croît, et si son augmentation est plus importante que celle de l'énergie interne U, un cristal contenant des défauts sera plus stable qu'un cristal parfait à la température envisagée. Dans les métaux purs, seuls les défauts lacunaires peuvent être considérés car les défauts de Frenkel impliquent une position interstitielle des atomes perturbateurs et la structure compacte des métaux ne permet pas cette disposition (sauf dans le cas d'alliages avec des métalloïdes dont le diamètre ionique est très faible : hydrogène, carbone, oxygène, etc.).

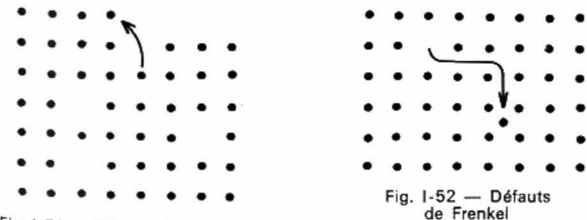


Fig. I-51 — Défauts de Schottky

Fig. I-52 — Défauts de Frenkel

Dans un cristal, le nombre de défauts d'équilibre augmente très vite avec la température (l'augmentation se fait selon une loi exponentielle). Lorsqu'on abaisse la température, le nombre de lacunes diminue mais il est nécessaire que ces lacunes diffusent vers la surface du cristal pour y disparaître. Au-dessous d'une certaine température la vitesse de migration devient trop faible pour que les défauts atteignent la surface. Pour cette raison, sauf pour les températures élevées, il subsiste toujours plus de défauts que ceux prévus par la théorie. La diffusion et la disparition des dislocations sous l'effet de la température se fait de la même façon. Il est possible de faire disparaître, au moins partiellement, les dislocations produites lors d'une déformation : il suffit de maintenir l'échantillon à une température déterminée pendant une durée suffisante afin de permettre la régénération du réseau par déplacement des défauts.

L'effet de la température sur les défauts obtenus par écrouissage peut être décomposé en trois phases :

a) *La restauration.* — Pour des températures de recuit peu élevées, les dislocations contenues dans le métal, réparties au hasard, se réorganisent afin que l'énergie interne diminue, la température étant suffisante pour accroître la mobilité des dislocations. Cependant, l'énergie fournie au réseau étant encore trop faible, elle ne peut pas provoquer la disparition des dislocations par diffusion vers la surface : on constate simplement une diminution des distorsions du réseau, et, par conséquent, un abaissement des tensions internes. La structure obtenue après écrouissage est maintenue. Dans certains cas, pour les températures les plus élevées, lors de cette phase, les plans cristallins (initialement courbés par la déformation) se morcellent en facettes du fait du réarrangement des dislocations, de telle sorte que l'énergie interne du réseau diminue. Lors de cette modification, les dislocations se disposent en parois entourant les facettes et l'on voit apparaître des sous-grains légèrement désorientés les uns par rapport aux autres à l'intérieur du grain (fig. I-53). Ce phénomène est appelé *polygonisation*.

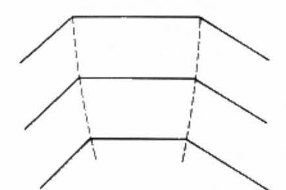


Fig. I-53

Représentation schématique d'une polygonisation

b) *La recristallisation.* — Pour des températures plus élevées, l'énergie est suffisante pour provoquer la diffusion des dislocations. On constate que l'ancienne structure écrouie est remplacée par une structure nouvelle qui se développe à ses dépens. Les nouveaux grains possèdent des orientations et des dimensions différentes de celles des grains initiaux. C'est le phénomène de recristallisation qui commence à partir de certaines zones très petites ou germes (où l'énergie, emmagasinée pendant la déformation, est importante) dès qu'une énergie thermique suffisante, dite *énergie d'activation* a été fournie ; la durée de recristallisation dépend de la nature du métal. Pour qu'il y ait recristallisation, une déformation minimale, appelée *écrouissage critique*, est nécessaire. Au-dessous de cette valeur, l'énergie de déformation emmagasinée est insuffisante pour provoquer la création de germes et l'on ne peut obtenir, au mieux, qu'une polygonisation. En outre, plus l'écrouissage est faible, plus la température minimale de recristallisation est élevée, et plus les dimensions des grains sont importantes ; à la limite, pour l'écrouissage

critique il est possible d'obtenir des grains de plusieurs centimètres (c'est d'ailleurs une méthode de préparation des monocristaux).

La figure I-54 représente un diagramme de recristallisation; celui-ci est évidemment fonction de la nature du métal et du mode de déformation utilisé. En outre, la valeur des différentes températures caractéristiques est fortement influencée par la teneur en impuretés du métal et par la nature de celles-ci; elles gênent le déplacement des dislocations et des joints de grains et il est nécessaire de fournir une énergie supplémentaire pour vaincre ces obstacles. Ainsi les solutions solides recristallisent à plus haute température et nécessitent des durées de recristallisation plus grandes; par exemple l'aluminium très pur recristallise à — 180 °C alors que l'aluminium commercial, contenant environ 0,5 % d'impuretés, cristallise à 200 °C. La recristallisation étant un phénomène de diffusion lié à la mobilité des atomes, sa vitesse est très influencée par la température de traitement et par la nature du métal.

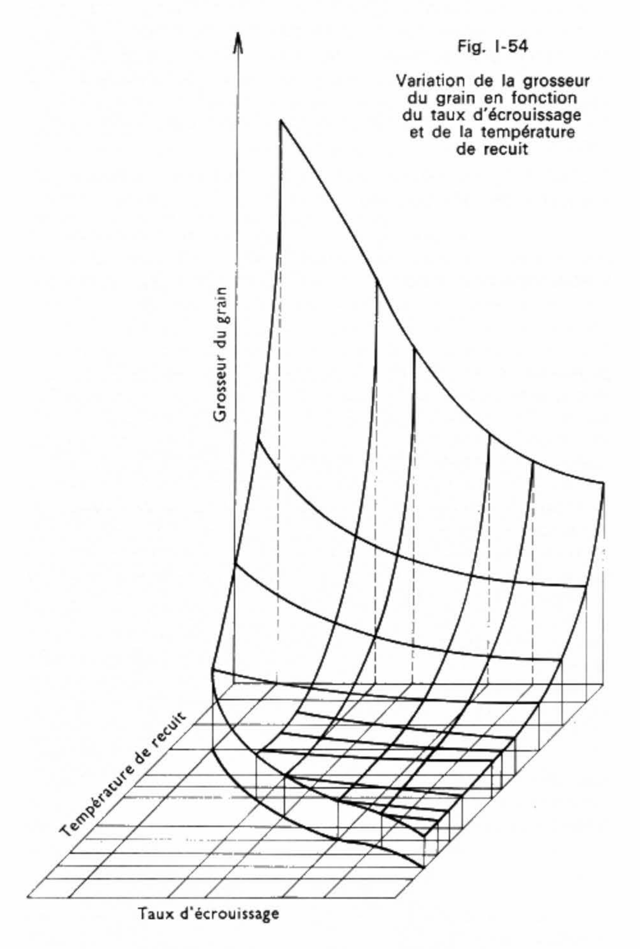


Fig. I-54
Variation de la grosseur du grain en fonction du taux d'écrouissage et de la température de recuit

c) *Le grossissement du grain.* — Ce phénomène est encore appelé recristallisation secondaire; il intervient dans la troisième phase, même si le métal est déjà recristallisé. L'apparition de ce défaut est général; il est habituellement appelé *surchauffe*. L'énergie totale d'un système est la somme de son énergie interne et de son énergie superficielle; lorsque l'énergie interne est minimale, on peut encore diminuer l'énergie libre si l'énergie superficielle est abaissée pour parvenir à la valeur la plus faible qui correspond au cas d'un monocristal sphérique (surface minimale pour un volume donné). Tout agrégat polycristallin, pour peu que la température soit suffisante, tend vers cet état d'équilibre. Ainsi, jusqu'à la seconde température critique, la vitesse de croissance est quasi nulle; au-delà de cette valeur, les grains les plus stables, c'est-à-dire les plus gros, se développent aux dépens de leurs voisins. À une température donnée, le grossissement est fonction du temps et de la pureté du métal.

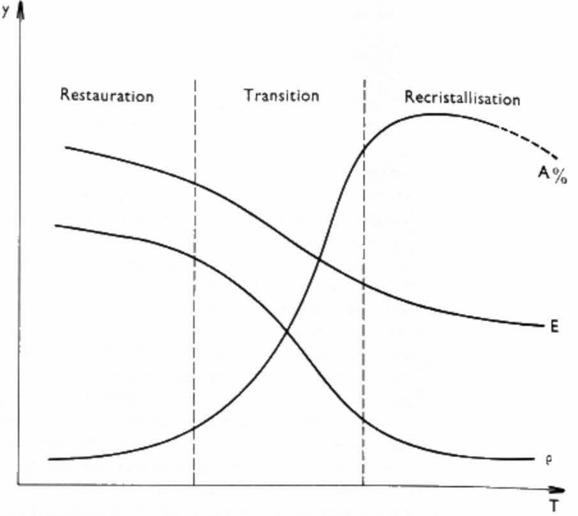


Fig. I-55 — Variation de différentes propriétés en fonction de la température de recuit (ρ: résistivité électrique, A: allongement à la rupture, E: module d'élasticité)

La figure I-55 présente l'évolution de certaines caractéristiques des métaux en fonction de la température pour des séjours isochrones.

3. LES ALLIAGES

Afin de mettre en évidence les propriétés de l'état métallique, jusqu'à présent on a uniquement envisagé le cas de métaux purs en signalant seulement comment leurs propriétés sont modifiées lorsqu'ils se trouvent pollués par de faibles quantités d'impuretés. Dans la pratique industrielle, sauf cas exceptionnels, les métaux purs ne sont pas utilisés. En effet, depuis les origines de la métallurgie, on a constaté que l'addition volontaire d'éléments déterminés modifiait considérablement les propriétés des métaux et que, par un choix judicieux de ces éléments, il était possible d'améliorer telles ou telles caractéristiques en fonction des impératifs d'utilisation. Les produits composés d'un métal et d'une ou plusieurs espèces d'éléments chimiques mais qui possèdent toujours les caractéristiques de l'état métallique telles qu'elles ont été définies précédemment, sont appelés alliages. Bien que les alliages puissent être composés d'un nombre quelconque d'éléments, par souci de simplicité on se bornera à l'étude détaillée des alliages binaires (composés de deux éléments).

3.1. Définition des alliages

3.1.1. Constituants. — À partir du moment où un système est composé de plusieurs éléments, il est nécessaire de préciser la notion de constituant qui est liée à la notion d'homogénéité. *Un constituant est un système homogène à l'échelle du mode d'observation considéré.* Ainsi lorsqu'on introduit un élément *B* dans un métal pur *A*, à l'échelle atomique le système est formé de deux constituants élémentaires: les atomes de *A* et ceux de *B* (il est par conséquent hétérogène au niveau de l'observation). Si les atomes de l'élément *B* s'insèrent dans le réseau du premier, si ces atomes se substituent à ceux constituant le réseau primitif, si les atomes se combinent pour former un composé ou se groupent par affinité, à l'échelle des cristaux formés on aura affaire à un système homogène appelé *phase*. Les phases elles-mêmes peuvent être observées directement lorsque les cristaux sont suffisamment gros. Certains mélanges de phases, formés de très petits cristaux, ce qui leur donne une apparence d'homogénéité, peuvent apparaître pour des conditions de concentration particulières (eutectiques, péritectiques, eutectoïdes) : on parle alors de constituants métallographiques dont l'ensemble constitue la structure micrographique de l'alliage. Ainsi, lorsqu'on observe un acier mi-dur (alliage, de fer et de carbone) au microscope à faible grossissement, on voit apparaître deux constituants métallographiques: la perlite (grains gris) et la ferrite (grains blancs). À plus fort grossissement, on constate que

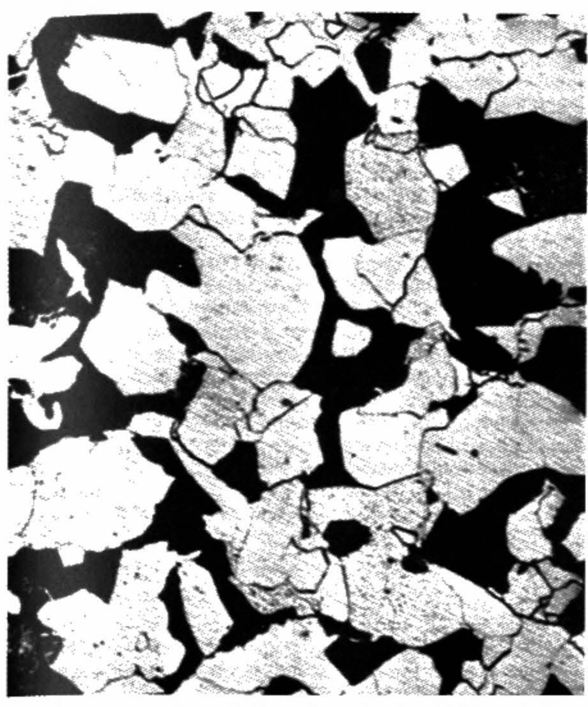


Fig. I-56 — Acier mi-dur: ferrite-perlite; attaque nital 3 %; (×200). La ferrite correspond aux parties claires et la perlite aux parties sombres (*IRSID*)



Fig. I-57 — Perlite résolue; attaque nital 3 %; (×900) (*IRSID*)

la ferrite conserve le même aspect, alors que, au contraire, la perlite est formée de deux constituants. Si l'on considère le système à une échelle encore plus petite, la ferrite est homogène au niveau du cristal où les atomes de carbone sont répartis entre les atomes de fer, c'est une phase et les deux constituants de la perlite sont également homogènes à ce niveau: l'une des phases est aussi de la ferrite, l'autre est un carbure de fer, la cémentite (fig. I-56 et I-57).

3.1.2. Structure des phases. — La structure des phases correspond à la manière dont les atomes de chacun des éléments sont répartis dans le cristal. On distingue différentes structures selon le mode de répartition.

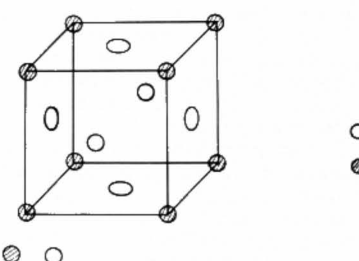
1° *Les solutions solides.* — Lorsque les atomes de chacun des éléments s'attirent à peu près de la même façon que s'ils étaient identiques, on obtient une dispersion statistiquement homogène et à l'état d'équilibre; elle est appelée *solution solide*. Ces solutions peuvent être obtenues dans de larges domaines de concentration.

On distingue deux modes de dispersion des atomes de l'élément soluté (élément ajouté au métal de base) dans le métal solvant (métal de base).

— Les *solutions solides dites de substitution* (fig. I-58) où les atomes de l'élément soluté se substituent à ceux du solvant; elles se forment lorsque les rayons ioniques des deux éléments sont suffisamment voisins;

— Les *solutions solides d'insertion* (fig. I-59) où les atomes de l'élément soluté se placent dans les espaces libres du réseau. Évidemment, il faut que le rayon ionique de ces éléments soit suffisamment faible pour qu'ils puissent pénétrer dans les intervalles de la structure de base. Ces conditions sont remplies en particulier par l'hydrogène et les métalloïdes de faible numéro atomique: carbone, oxygène, azote, etc.

Dans la plupart des cas, la distribution des atomes de soluté est parfaitement aléatoire, et la solution est dite ***désordonnée***; cependant, sous certaines conditions, dans les solutions solides de substitution les atomes du soluté peuvent se répartir en un arrangement régulier ordonné (fig. I-60), cette solution est dite *ordonnée* et forme une surstructure. Elle apparaît lorsque les atomes d'une sorte ont une affinité plus grande pour les atomes de l'autre espèce, et ont tendance à s'en entourer. Le passage de la solution ordonnée à la solution désordonnée s'appelle une *transformation ordre-désordre*. Les conditions de formation d'une solution ordonnée sont étroites car il est nécessaire que le nombre d'atomes dans la solution soit dans un rapport simple (1/1 et 3/1). Même si l'alliage présente une solution solide pour des concentrations correspondantes à celles-ci, il n'est pas obligatoire qu'une surstructure se forme, car l'entropie de désordre étant très faible, les conditions d'énergie libre minimale ne sont pas toujours remplies. Les figures I-61 et I-62 montrent deux types de surstructure pour le système cubique centré et dans le système cubique à faces centrées.



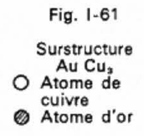


Fig. I-61

Surstructure $AuCu_3$
○ Atome de cuivre
◍ Atome d'or

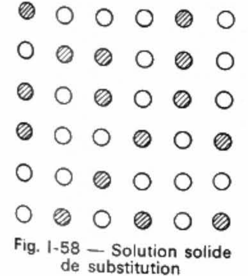


Fig. I-58 — Solution solide de substitution

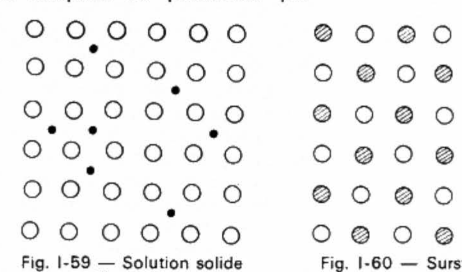


Fig. I-59 — Solution solide d'insertion

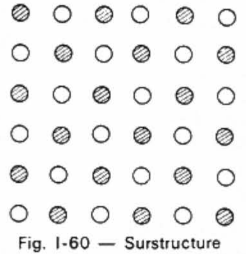


Fig. I-60 — Surstructure

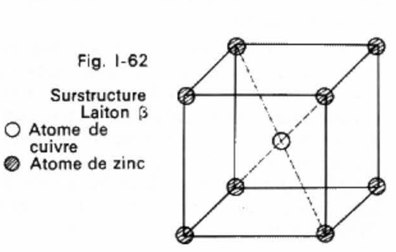


Fig. I-62

Surstructure Laiton β
○ Atome de cuivre
◍ Atome de zinc

De plus, les solutions peuvent être plus ou moins étendues, c'est-à-dire qu'elles peuvent accepter une quantité plus ou moins grande d'atomes de soluté. Lorsque le métal solvant accepte une quantité croissant d'une valeur nulle à la valeur de saturation, on dit que la solution solide est *primaire ;* les solutions solides primaires cristallisent dans le même système que le solvant. Pour des concentrations plus grandes, il peut apparaître de nouvelles solutions solides, sans filiation avec les précédentes dites solutions solides *secondaires*, qui cristallisent en général dans un système différent de celui du solvant. Avec d'autres phases dont on parlera ci-après, ces solutions solides secondaires font partie des phases intermédiaires. Au contraire, si la solubilité du soluté dans le solvant est infinie et qu'il existe une filiation continue entre le métal *A* et le métal *B*, la solution est dite *solution solide unique*.

La structure atomique des éléments détermine la proportion dans laquelle un métal peut en dissoudre un autre pour former une solution solide primaire de substitution. Les principes généraux qui régissent le phénomène sont appelés *lois de Hume-Rothery;* elles concernent :

a) *Le facteur de dimension.* — Pour qu'il puisse se former une solution solide d'étendue notable, il est nécessaire que le facteur de taille soit favorable : plus la différence entre la dimension des atomes est grande plus la solubilité est faible (il est d'ailleurs plus rigoureux de considérer le rayon ionique plutôt que le rayon atomique). En résumé, il est nécessaire que le diamètre du soluté et celui du solvant diffèrent de moins de 15 % pour observer une solubilité étendue.

Pour obtenir une solution solide unique, en général, on admet que la différence des rayons ioniques doit être inférieure à 8 %, et que les deux métaux doivent cristalliser dans le même système. On connaît une quarantaine d'alliages donnant des solutions solides uniques ; certaines ne sont stables qu'à température élevée, l'existence de transformations allotropiques d'un des constituants ne permettant plus le respect de la règle d'identité des systèmes cristallins au-dessous de ces températures de transformation. Parmi les alliages donnant des solutions solides à toutes températures on peut citer des couples tels que : Au-Cu, Mo-W, Ag-Au, Cu-Ni, etc.

b) *Le facteur d'affinité chimique.* — La solubilité est réduite par la tendance des composants à former des composés chimiques. Cette tendance est d'autant plus forte que l'un des composants est plus électropositif et l'autre plus électronégatif. Ainsi les éléments à caractère métallique du groupe VI (Se, Te) du tableau périodique des éléments forment des composés stables (séléniure, tellurure) avec les métaux électropositifs. Les éléments du groupe V (As, Sb, Bi) ont des domaines de solubilité très réduits dans les métaux électropositifs ; ces domaines sont d'autant plus étendus que le caractère électropositif est plus faible.

c) *Le facteur de valence relative.* — Un solvant possède une capacité définie d'accepter des électrons de valence provenant d'un soluté si le facteur de taille est favorable. Si le métal dissous a une valence supérieure à celle du solvant, et lorsque les deux premières conditions sont respectées, la solubilité maximale correspond à une densité électronique de l'ordre de 1,3 (la densité électronique correspond au nombre total d'électrons de valence rapporté au nombre total d'atomes).

Soit c la concentration du solvant, n sa valence et $n + k$ la valence du soluté, la condition précédente se traduit par la relation suivante : $nc + (1 - c)(n + k) = 1{,}3$.

Si le métal dissous a une valence inférieure, il y a défaut d'électrons par rapport au métal pur : l'édifice cristallin ne peut être maintenu et l'étendue de la solution solide est alors très faible.

En ce qui concerne les solutions solides intermédiaires, dans lesquelles les ions sont maintenus en contact par des liaisons du type métallique, la concentration électronique a également une influence prépondérante et le domaine de solubilité est relativement étendu. En considérant les systèmes pour lesquels aucun des éléments n'est fortement électronégatif, Hume-Rothery a montré que la concentration électronique des différents systèmes correspondait à l'une des trois valeurs suivantes : 3/2 cristallisant dans le système cubique centré (laiton β), dans le système cubique complexe (Ag-Al, Cu_5-Si), dans le système hexagonal compact (Ag-Cd) ; 21/13 cristallisant dans le système cubique complexe (Cu_5-Zn_8, Cu_{31}-Sn_8, Cu_9-Al_4, etc.) ; 7/4 cristallisant dans le système hexagonal compact (Cu-Zn_3, Cu_3-Sn, Cu-Be_3). Dans la détermination des concentrations électroniques, la valence des métaux de transition est prise égale à zéro. Ces solutions solides de type particulier sont également appelées *composés électroniques*.

Comme on l'a déjà indiqué, avec des solutés dont le diamètre atomique est petit peuvent se former des solutions solides interstitielles ; ainsi l'hydrogène, l'azote, le carbone, le phosphore, qui ne sont pas fortement électronégatifs, peuvent donner de véritables solutions d'insertion intermédiaire (notamment avec les métaux de transition) à condition que le rayon de l'atome de soluté soit inférieur à 0,59 fois celui de l'atome du solvant.

Les figures I-63 et I-64 permettent de calculer le plus grand diamètre de l'atome soluté pouvant être inscrit dans l'espace laissé par les atomes du solvant ; dans le cas d'une structure cubique centrée on obtient :

$$\rho = \frac{\sqrt{5} - \sqrt{3}}{\sqrt{3}} R = 0{,}29\ R$$

dans le cas d'une structure cubique à faces centrées :

$$\rho = R\,(\sqrt{2} - 1) = 0{,}41\ R$$

On constate que la structure compacte possède des sites interstitiels ne permettant d'admettre que des atomes nettement plus petits que la structure cubique centrée.

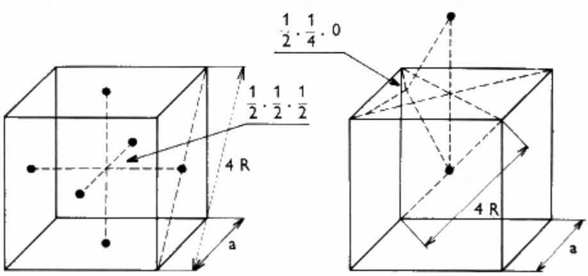


Fig. I-63 — Système C F C
Plus gros interstice

Fig. I-64 — Système C C
Plus gros interstice

Ces structures sont généralement centrées sur des compositions de la forme M_4X, M_2X, MX et MX_2 (M et X représentent respectivement les atomes métalliques et les atomes non métalliques). Lorsque le rapport des rayons atomiques est supérieur à 0,59, il se forme des structures plus compliquées proches des composés définis. En outre, ces éléments sont susceptibles de former des solutions solides primaires interstitielles. Comme on vient de le voir, les interstices du réseau cubique à faces centrées permettent d'admettre des atomes de rayons supérieurs à ceux admis dans le système cubique centré ; par conséquent, la solubilité est plus grande dans le premier cas. C'est en particulier ce qui se passe pour le carbone et les deux formes allotropiques du fer ; cette propriété est d'une importance technique considérable car elle est à la base du traitement thermique des aciers.

2° *Les composés intermétalliques.* — Ce sont des composés définis qui correspondent à de véritables corps chimiques de composition stœchiométrique parfaitement déterminée. Ils apparaissent lorsque les métaux sont très éloignés dans la classification périodique des éléments et que, par conséquent, ils sont respectivement, l'un fortement électropositif et l'autre fortement électronégatif. Dans ce cas, il n'existe aucun domaine de solubilité ; on observe un point de fusion congruent ; les composés formés sont très stables, les chaleurs de formation sont importantes. Ces composés ne présentent plus le caractère métallique.

Un type particulier de composés intermétalliques peut également apparaître ; il est désigné sous le nom de *phase de Laves* et sa formule générale est de la forme A_2X. Les phases de Laves sont formées de couches doubles de symétrie hexagonale. Fréquemment, elles présentent un point de fusion congruent, ou elles se décomposent avant fusion à une température déterminée. Elles possèdent cependant un caractère métallique assez accusé.

3° *Les structures lacunaires.* — Il existe des solutions solides intermédiaires, ou des composés, dont tous les nœuds du réseau ne sont pas occupés : ces structures sont dites *lacunaires.* Un exemple très connu est celui de la phase β du système nickel-aluminium. Pour la composition nickel-aluminium, les atomes d'aluminium sont au sommet du cube et les atomes de nickel, plus petits, au centre. Si l'on augmente la concentration de nickel, les atomes de cet élément remplacent les atomes d'aluminium ; au contraire, si l'on augmente la concentration d'aluminium, seuls quelques atomes d'aluminium se placent aux centres inoccupés, au-delà de 60 atomes pour cent quelques centres deviennent vacants. Pour la composition Ni_2Al_2 il manque un atome de nickel sur trois dans la structure.

4° *Application de la théorie des zones à la justification des domaines de solubilité.* — Jones a montré que les phénomènes dépendant de la concentration électronique étaient liés à l'influence de l'énergie des électrons de valence sur la concentration et la structure cristalline, et que cette influence pouvait être expliquée par la théorie des zones. On va calculer la longueur d'onde associée aux électrons de plus grandes énergies, longueur d'onde qui correspond à la réflexion de Bragg pour ces électrons. Si V est le volume du métal et N_e le nombre d'électrons libres, on peut écrire (V. § 2.2.1) :

$$\lambda_{\min} = 2\left(\frac{\pi V}{3N_e}\right)^{1/3}$$

Il est possible d'exprimer $\lambda_{\min}$ au moyen du nombre d'atomes par unité de volume. Dans le cas d'un réseau cubique à faces centrées, la première réflexion se produit sur les plans (1.1.1) lorsque $\lambda = 2\,d$ et si a est le paramètre du réseau, il vient :

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

d'où l'on tire :

$$\lambda_{\min} = \frac{2a}{\sqrt{3}}$$

Or, dans un réseau cubique à faces centrées, il y a 4 atomes par maille (de volume égal à a^3) et si N_A est le nombre d'atomes dans le métal on peut écrire :

$$a = \left(\frac{4V}{N_A}\right)^{1/3} \quad \text{et} \quad \lambda_{\min} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{4V}{N_A}\right)^{1/3}$$

En égalant les deux expressions de $\lambda_{\min}$ on tire :

$$2\left(\frac{\pi}{3}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{V}{N_e}\right)^{1/3} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{4V}{N_A}\right)^{1/3}$$

et :

$$\frac{N_e}{N_A} = \frac{\pi\sqrt{3}}{4} = 1{,}36$$

valeur très voisine de la valeur de concentration électronique obtenue expérimentalement pour la limite de concentration des solutions solides primaires. Le calcul est identique pour les phases cristallisant dans le système cubique centré, en tenant compte de la nature du plan réflecteur et du nombre d'atomes par maille. Dans ce cas, on trouve une densité électronique égale à 1,48 très proche de la valeur empirique 3/2.

3.2. Comportement thermique des alliages

3.2.1. Thermodynamique appliquée aux diagrammes d'équilibre. — Les structures de phase des alliages ont été étudiées expérimentalement ; les résultats ont été rassemblés sous forme de diagrammes appelés *diagrammes d'équilibre* qui indiquent les domaines d'existence de chacune des phases en fonction de la concentration et de la température. Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu, on peut appliquer les principes thermodynamiques des équilibres hétérogènes moyennant quelques hypothèses simplificatrices. La méthode est restrictivement utilisée à la compréhension des systèmes, les connaissances actuelles ne permettant pas d'effectuer quantitativement ces calculs.

a) *Énergie libre des phases.* — Précédemment, on a vu que, dans le cas d'un métal pur, l'énergie libre d'un système permettait de définir sa stabilité en fonction de la température. Dans le cas d'un alliage, les atomes n'étant pas tous identiques, on doit faire intervenir l'entropie et l'énergie interne du mélange ; connaissant U et S, il est alors possible d'étudier la variation de l'énergie libre du système $F = U - TS$.

b) *Calcul de l'énergie libre d'une solution solide.* — Pour calculer l'énergie interne d'un cristal, on suppose qu'à 0 K son énergie interne est la somme des énergies d'interaction entre les atomes proches voisins et que l'énergie d'interaction d'une paire d'atomes est une constante qui dépend de leur nature ; on pose donc que l'énergie interne est égale à U_{AA} pour deux atomes de A à U_{BB} pour deux atomes de B et à U_{AB} lorsque le couple est constitué d'un atome A et d'un atome B. On écrit :

$$U = \Sigma U_{AA} + \Sigma U_{BB} + \Sigma U_{AB}$$

Si N_A est le nombre d'atomes de A et N le nombre total d'atomes, chaque atome étant entouré de Z voisins, la concentration C en atomes A est égale à $\frac{N_A}{N}$, et il y a ZC paires de AA, $Z\,(1 - C)$ paires de B et $Z\,(1 - C)$ paires de AB. Au total, pour N atomes, le nombre de paires est égal à :

pour AA : $1/2\,NC\,ZC = 1/2\,NZC^2$

pour BB : $1/2\,N\,(1 - C)\,Z\,(1 - C) = 1/2\,NZ\,(1 - C)^2$

pour AB : $NCZ\,(1 - C)$

L'énergie U est aussi donnée par la relation suivante :

$$U = 1/2\,NZ\left[CU_{AA} + (1 - C)\,U_{BB} + 2\,C\,(1 - C)\left(U_{AB} - \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}\right)\right]$$

Les deux premiers termes donnent l'énergie des cristaux pour les métaux purs ; leur somme correspond à l'énergie de l'alliage lorsqu'il est formé d'un mélange de cristaux purs. Le dernier terme est caractéristique de l'énergie de la solution.

- $U_{AB} > \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}$: l'énergie interne de la solution est supérieure à celle du mélange des deux constituants purs et l'alliage a tendance à prendre la forme d'un mélange de A et de B ; en réalité il y a deux phases, l'une riche en A, l'autre riche en B.
- $U_{AB} < \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}$: il y a tendance à la formation d'une solution solide d'une phase intermédiaire ou d'un composé défini.
- $U_{AB} = \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}$: l'énergie interne est complètement indépendante de la distribution des atomes.

La variation de U est donnée par la figure I-65 a, b, c

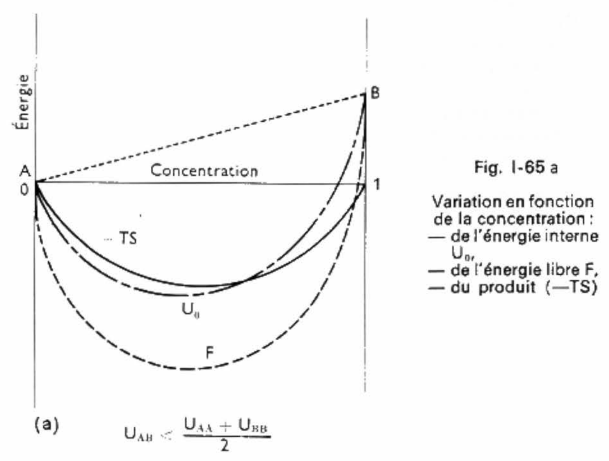


Fig. I-65 a

Variation en fonction de la concentration : — de l'énergie interne U_0, — de l'énergie libre F, — du produit (—TS)

On démontre que l'entropie de désordre est égale à :

$$S = -NkT\,[C \ln C + (1 - C) \ln (1 - C)]$$

À partir de ces valeurs il est donc possible de calculer l'énergie libre, l'entropie à la température T étant égale à la somme de l'entropie thermique et de l'entropie de mélange.

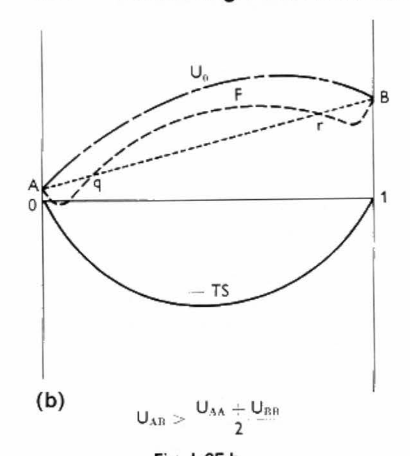


Fig. I-65 b

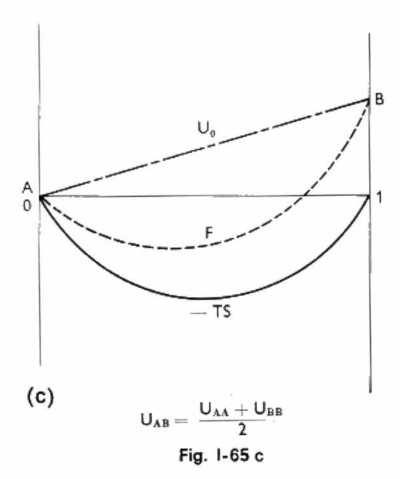


Fig. I-65 c

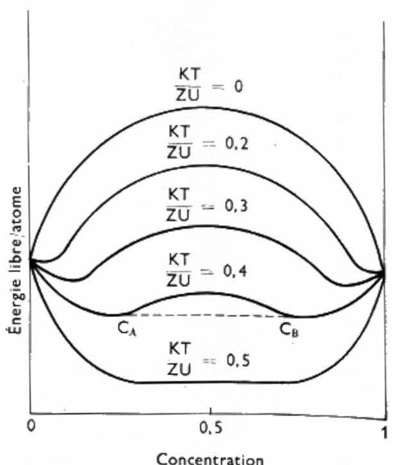


Fig. I-67 — Variation de l'énergie libre en fonction de la concentration pour différentes températures

$$F = N \left\{ 1/2\, Z \left[CU_{AA} + (1 - C)\, U_{BB} + 2C(1 - C) \left(U_{AB} - \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2} \right) \right] + kT\, [C \ln C + (1 - C) \ln (1 - C)] \right\} + \int_0^T c_p\, dT - T \int_0^T \frac{c_p\, dT}{T}$$

Si A et B sont de nature peu différente, c_p varie peu avec C et on peut écrire $\int_0^T c_p\, dT - T \int_0^T \frac{c_p}{T}\, dT = g(T)$. Les schémas de la figure I-65 montrent la variation de F en fonction du signe de $U_{AB} - \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}$.

c) *Etat stable d'un alliage, mélange de phases* (fig I-66). — L'alliage pouvant exister sous forme d'une solution solide ou d'un mélange de phases, il est nécessaire de déterminer lequel des deux états possède l'énergie libre minimale, et par conséquent est l'état stable. Si l'on considère l'alliage de composition C, l'énergie libre est représentée par l'intersection de la droite CC' avec celle joignant l'énergie libre de chacun des constituants.

Dans le premier cas, l'énergie libre correspond à F_1 pour les constituants A_1 et B_1, à F_2 pour les constituants A_2 et B_2, et l'on constate que le minimum correspond à F_3 pour lequel A_3 et B_3 sont confondus. Par conséquent, à la température envisagée, l'état stable de l'alliage est la solution solide. En outre, quelle que soit la concentration C, l'énergie libre minimale correspond toujours à un point pour lequel A_n et B_n sont confondus, et l'état stable est une solution solide homogène à toutes concentrations.

Dans le deuxième cas, l'énergie libre minimale correspond aux points A_3 et B_3. Pour ces concentrations comprises entre A et C_A et entre C_B et B, l'énergie libre minimale est celle donnant des solutions solides. Pour les concentrations comprises entre C_A et C_B, l'énergie libre F_3 correspond au mélange des deux solutions solides α et β de concentration C_α et C_β, et la proportion des phases présente dans l'alliage est égale à : $C_\alpha = \frac{C_B - C}{C_B - C_A}$ et $C_\beta = \frac{C - C_A}{C_B - C_A}$

Comme $C_B - C_A$ est une constante, et que $C_B - C$ et $C - C_A$ varient linéairement avec C, la proportion des deux phases varie linéairement avec la concentration dans le domaine biphasé.

d) Variation de la solubilité avec la température. — La proportion de soluté admise par un solvant augmente avec la température. Si un alliage existe à basse température, sous forme d'un mélange de phases, c'est que l'énergie interne est plus faible que pour une solution. Lorsque la température s'élève, le terme entropique TS croît et la solution possède donc une entropie supérieure au mélange. Par conséquent, l'élévation de température favorise le développement du système possédant l'entropie la plus grande, et le domaine de solubilité croît. Si, comme précédemment, on effectue le calcul de l'énergie libre dans le cas symétrique pour lequel $U_{AA} = U_{BB} = U_0$, on peut écrire :

$$U_{AB} - \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2} = U_{AB} - U_0 = U$$

L'énergie libre est alors égale à :

$$F = 1/2\, NZ\, U_0 + NZ\, C\, (1 - C)\, U + NkT\, [C \ln C + (1 - C) \ln (1 - C)] + g(T)$$

Seule la variation de l'énergie libre en fonction de la composition est intéressante ; dans ce cas, il est donc possible d'éliminer les termes indépendants de la composition et de ne considérer que l'énergie libre par atome :

$$f = \frac{F}{N} = ZUC\, (1 - C) + kT\, [C \ln C + (1 - C) \ln (1 - C)]$$

Le rapport $\frac{ZU}{k}$ a les dimensions d'une température, et il convient donc de mesurer la température du système en fonction de $\frac{kT}{ZU}$. Les courbes d'énergie libre correspondant à des valeurs croissantes de ce rapport sont représentées sur la figure I-67.

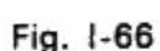
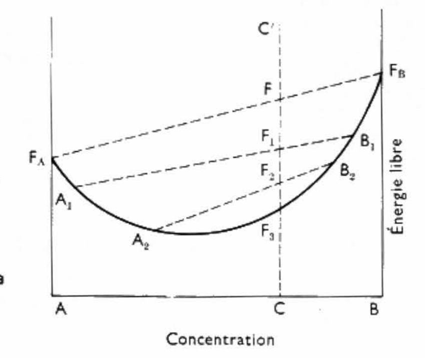
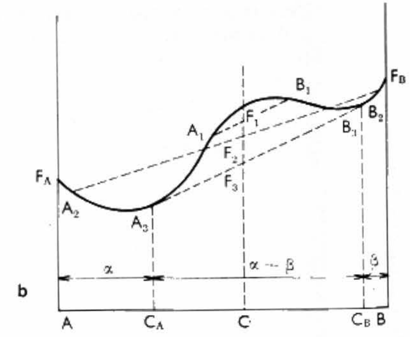


Fig. I-66

Détermination de l'état stable d'un alliage. Diagramme énergie libre-concentration
a : Solution solide
b : Mélange de phases





Lorsque la température augmente, l'accroissement de l'énergie libre est de moins en moins important à l'approche de la concentration équiatomique, par suite de l'augmentation de l'entropie du mélange. Chaque courbe présente deux minimums qui se rapprochent progressivement. Pour $\frac{kT}{ZU} = 0{,}5$, l'énergie libre passe par un minimum au voisinage de $C = 0{,}5$, car le terme TS devient suffisamment grand aux températures élevées et l'énergie libre décroît constamment lorsqu'on approche de cette concentration, même si l'énergie interne augmente. Donc, lorsque la température devient suffisamment élevée, même des alliages pour lesquels $U_{AB} < \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}$ peuvent exister sous forme de solutions solides uniques, homogènes et désordonnées dans tous les domaines de composition, si ces alliages sont encore solides à cette température.

Dans le cas examiné figure I-68, les limites de solubilité coïncident avec les minimums des courbes d'énergie libre (points C_A et C_B).

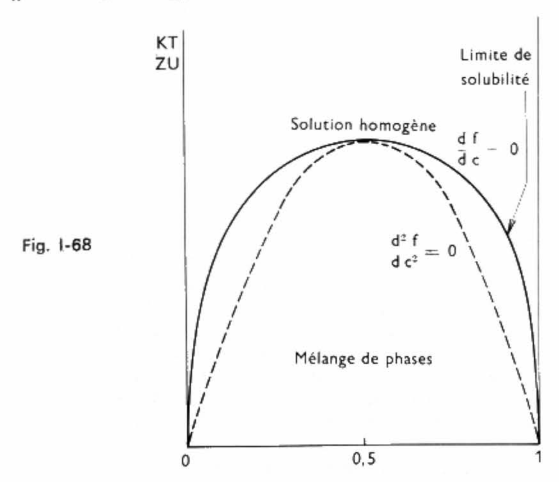


Fig. I-68

3.2.2. Les diagrammes d'équilibre. — Les diagrammes d'équilibre sont des figures qui permettent de représenter la variation des limites des domaines d'existence des phases à l'équilibre thermodynamique en fonction de la température et de la composition. Leur utilisation est précieuse pour la prévision de transformations telles que la usion, la solidification et les changements de phase.

1° *Solidification et transformation à l'état solide des alliages*

— *Solutions solides uniques.* — Le cas le plus simple est celui de la solidification de solutions solides uniques. Si l'on considère la variation de l'énergie libre en fonction de la composition pour différentes températures, on obtient les figures I-69. Lorsque la température est supérieure à T_1, la phase liquide a une énergie libre inférieure à la phase solide; à cette température tous les alliages du système sont liquides. Lorsque la température s'abaisse, l'énergie libre du liquide augmente plus rapidement que celle du solide, et à T_2 le liquide est en équilibre avec un solide de composition égale à A: cela représente la température de fusion du métal A. À la température T_3, la phase solide est plus stable que le liquide entre A et C et c'est le contraire entre C et B (C est compris entre C_1 et C_2 sur la figure I-69 f). En revanche, entre C_1 et C_2, c'est le mélange des deux phases qui est plus stable que chacune de celles-ci seule ; l'énergie libre du mélange est plus faible que l'énergie libre de chacune des phases. À la température T_4, le liquide B est en équilibre avec la phase solide : c'est le point de fusion du métal B. À plus basse température, la courbe d'énergie libre de la phase solide est inférieure à celle du liquide, le métal est entièrement solide. Le diagramme d'équilibre obtenu est représenté figure I-69 f. La courbe supérieure, séparant le domaine entièrement liquide du domaine où liquide et solide sont présents simultanément, est appelée *liquidus*; la courbe, séparant le domaine entièrement solide du domaine (liquide + solide), est appelée *solidus*.

Ce diagramme permet de décrire concrètement le phénomène de solidification. Soit un alliage de composition C_x; son comportement en fonction de la température peut être précisée en suivant la droite $C_x' C_x$. On constate que jusqu'à la température T_L, l'alliage est entièrement liquide; au point L apparaissent les premiers cristaux solides de composition C_{x1} en équilibre avec le liquide de composition C_x. Lorsque la température s'abaisse, il se forme de nouveaux cristaux solides et la composition moyenne de la phase solide, en équilibre avec le liquide, varie en fonction de la température de la concentration C_{x1} à la concentration C_x (aux dépens du liquide dont la composition évolue de la concentration C_x à la concentration C_{x2}). Les deux courbes se conjuguent et la concentration moyenne C_x de l'alliage est bien constante. À la température T_S, la dernière goutte de liquide disparaît et l'alliage est entièrement solidifié. L'intervalle LS est appelé *intervalle de solidification*.

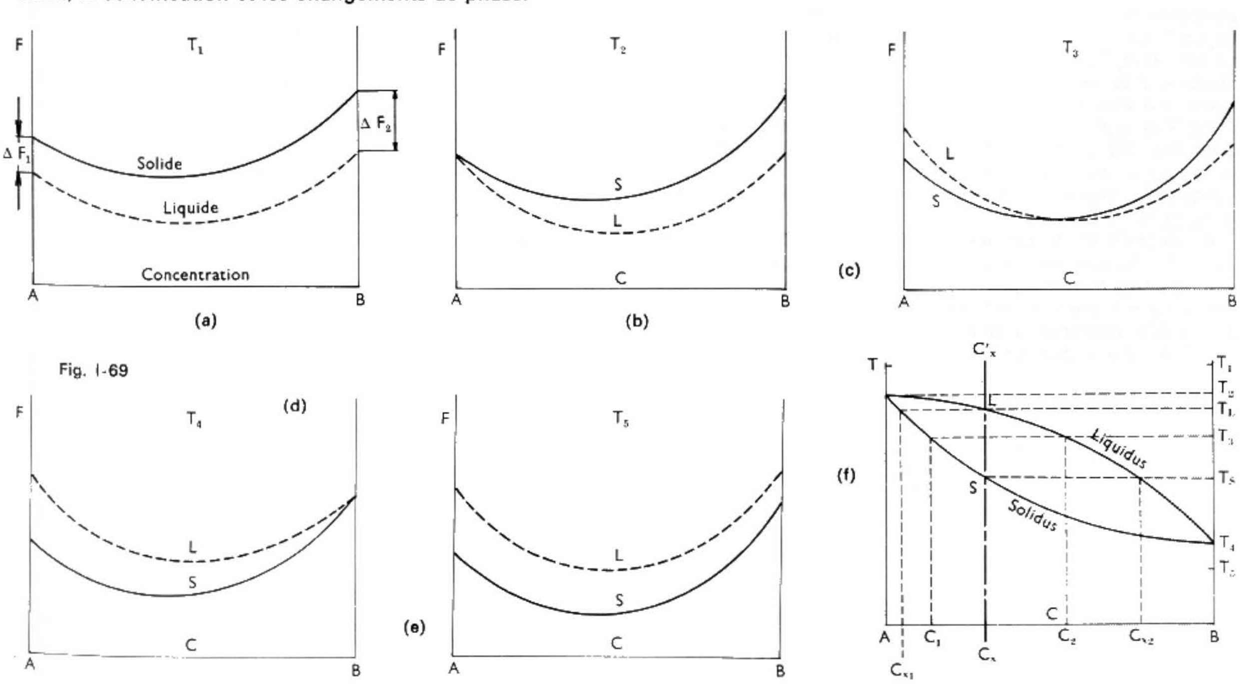


Fig. I-69

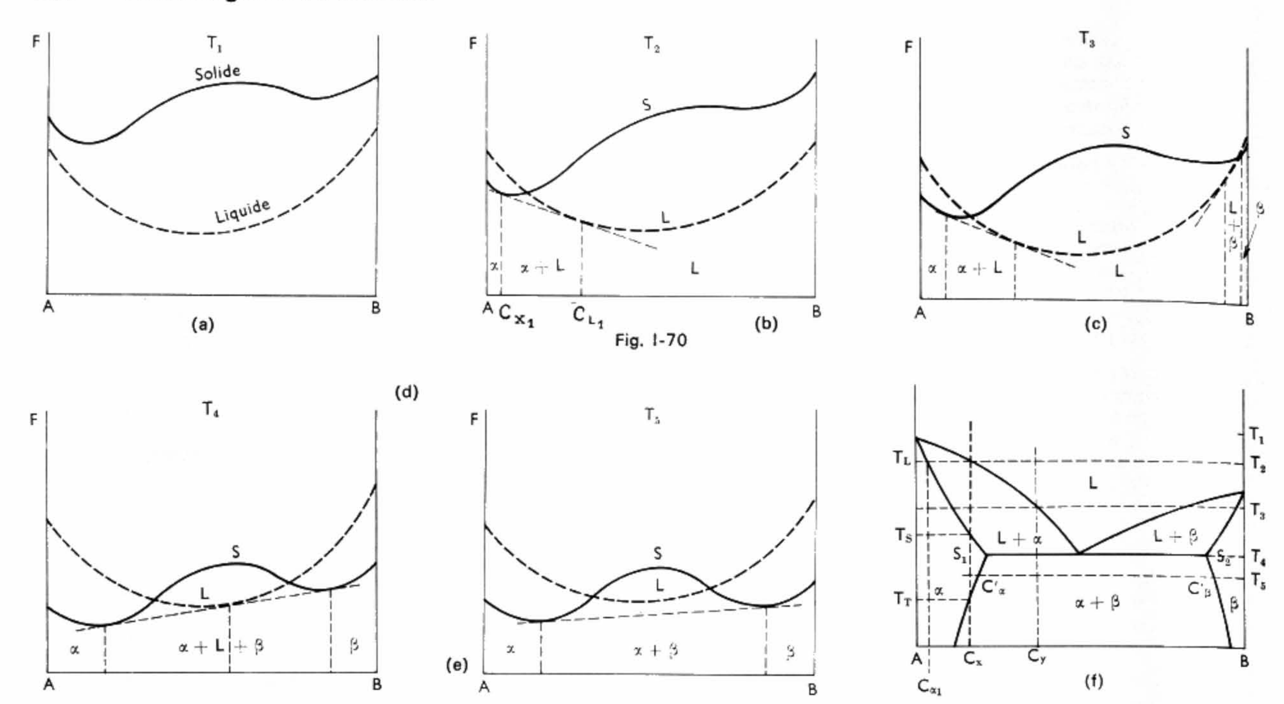
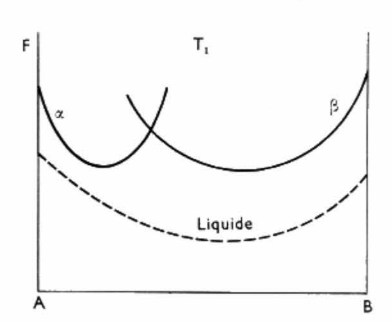


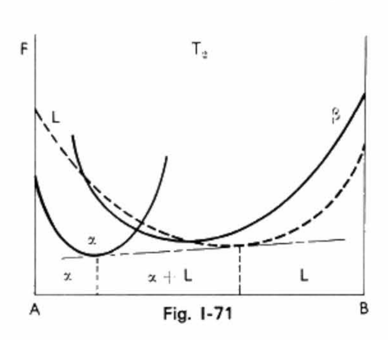
Fig. I-70

— *Solutions solides limitées à point eutectique.* — Ce cas se présente lorsque les deux métaux sont partiellement solubles l'un dans l'autre à l'état solide et que leurs températures de fusion ne sont pas trop différentes. Dans les alliages pour lesquels les constituants cristallisent dans le même système, on obtient un mélange de phases à des températures telles que : $\frac{kT}{ZU} < 0{,}5$ lorsque $U_{AB} > \frac{U_{AA} + U_{BB}}{2}$; la courbe d'énergie libre a l'allure indiquée sur les figures I-70. Lorsque la température s'abaisse à partir de T_1 (pour laquelle les alliages sont entièrement liquides) et si l'on dépasse la température où le métal *A* se solidifie, on atteint le point T_2. Dans le domaine de stabilité maximale correspondant à l'intervalle $C\alpha_1 — C_{L1}$, on constate la présence simultanée du liquide et d'une solution solide α de composition α_1 existant seule pour les concentrations inférieures à $C\alpha_1$; pour les concentrations supérieures à C_L, seule la phase liquide est stable. À une température T_3 inférieure à la température de solidification du métal *B*, une phase β apparaît dans les mêmes conditions que la phase α. À la température T_4, les deux tangentes se confondent, donc la tangente aux deux minimums de la courbe d'énergie libre du solide est également tangente à la courbe du liquide. Le point ainsi défini est le *point eutectique* auquel correspondent une température et une concentration eutectiques. Au-dessous de cette température tous les alliages sont solides. Le diagramme d'équilibre obtenu est représenté sur la figure I-70 f.

• *Solidification de deux alliages de concentration* C_x *et* C_y. Dans le premier cas, les cristaux solides de solution α et de concentration $C\alpha_1$ apparaissent à la température T_L ; comme avec une solution solide unique, la dernière goutte de liquide disparaît à température T_S pour donner une solution solide primaire α_1. Si la température s'abaisse encore, à la température T_T se forme la phase β aux dépens de la phase α. L'équilibre n'est obtenu que pour un mélange de deux phases de concentration égale à $C'\alpha$ et $C'\beta$. Dans le cas de l'alliage de concentration C_y, le phénomène de solidification est identique entre *liquidus* et *solidus* ; la solidification est terminée à la température eutectique. À l'équilibre, l'alliage se présente sous forme d'un mélange des phases α et β dont le rapport et la composition peuvent varier en fonction de la variation de la concentration de saturation de chacune des phases lorsque la température s'abaisse. Pour la concentration eutectique, la transformation peut être assimilée à une réaction d'équilibre : liq ⇌ α + β. Pour les concentrations comprises entre S_1 et S_2, le point figuratif de la composition du liquide décrit le *liquidus* si bien qu'à la température eutectique le liquide restant a la concentration eutectique. La solidification se termine également par une réaction au sein du liquide restant : liq ⇌ α + β ; la masse de ce liquide est fonction de la proximité de C_x et de la concentration eutectique.

— *Solutions solides limitées de type péritectique.* — Le cas se présente lorsque les deux métaux sont partiellement solubles l'un dans l'autre à l'état solide et que leurs températures de fusion sont très différentes. Dans le cas représenté par ces diagrammes, il se forme deux solutions solides α et β (fig. I-71). La courbe d'énergie libre de la phase β est située plus haut que celle de la phase α et le point de fusion de *B* est très bas ; il en résulte que lorsque la température T_3 est suffisamment basse pour qu'apparaisse la phase β, celle-ci se forme dans un domaine de compositions pour lequel à une température T_2 légèrement supérieure il existait un mélange de la phase α et de liquide. Dans ce cas, la courbe d'énergie libre de β traverse la tangente commune aux deux autres courbes d'énergie libre lorsque la température diminue. Dans un tel système





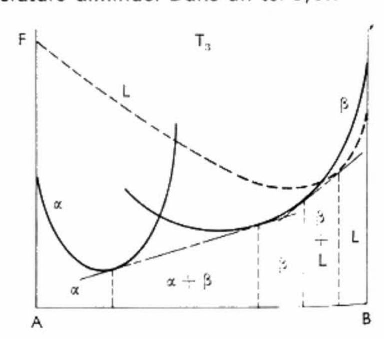


Fig. I-71

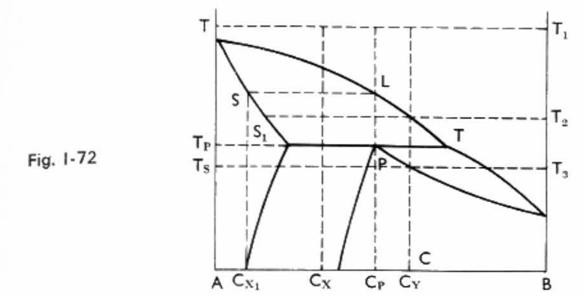


Fig. I-72

la disposition des limites de phases est inverse de celle d'un système eutectique. La composition correspondant au point P est dite *composition péritectique*; la transformation a lieu à la température péritectique. Un tel diagramme est représenté figure I-72.

Le phénomène de solidification des solutions solides primaires est identique à celui décrit précédemment. Mais, si l'on considère les trois alliages de concentrations C_p, C_x, C_y le processus est différent. Dans le cas de l'alliage C_p, lorsque le point figuratif de la température de l'alliage traverse le *solidus*, il apparaît des cristaux de solution α de concentration C_{x1}. Lorsque la température s'abaisse, le point figuratif de la concentration moyenne de la phase solide décrit la portion de *solidus* $S - S_1$, et celui du liquide, la portion de *liquidus* LT. À la température T_p, le liquide de concentration C_T et le solide de concentration C_{S_1} réagissent pour former la phase β selon le schéma : liq + $\alpha_{S_1} \rightleftharpoons \beta$; à basse température, seule subsiste la phase β, stable pour cette composition Dans le cas de l'alliage de concentration C_x, la transformation est identique entre le *liquidus* et le *solidus*, mais à la température T_p, il y a un excès de cristaux α_{S_1} par rapport au liquide de concentration C_T, et seule la fraction de α correspondant à la stœchiométrie de la réaction : liq + $\alpha_{S_1} \rightleftharpoons \beta$ réagira avec la phase liquide. À basse température, il y a donc en présence des cristaux α_{S_1} propéritectique et de la phase β péritectique. En ce qui concerne l'alliage de concentration C_y à la température T_p, il y a excès de liquide et l'on obtient un mélange liquide-solution solide β. À la température T_s, l'excès de liquide se solidifie pour donner également de la phase β.

— *Phases intermédiaires.* — On a vu précédemment que certains métaux peuvent former des phases intermédiaires, (c'est-à-dire pouvant être obtenue directement à partir du liquide : fusion congruente). Le diagramme correspondant est présenté sur les figures I-73 ; entre les deux solutions solides primaires α et γ se place la solution solide intermédiaire β. Les courbes d'énergie libre sont disposées de telle sorte que la courbe correspondant à β soit la première à traverser la courbe d'énergie libre du liquide ; lorsque la température continue à décroître les phases α et γ apparaissent successivement. Au-dessous de T_4 les courbes d'énergie libre des trois phases solides sont disposées de telle sorte que les quatre tangentes se confondent deux à deux pour former deux tangentes déterminant les domaines des mélanges de phase. Dans l'exemple proposé, il se forme deux eutectiques mais d'autres diagrammes, tel celui de la figure I-73 f, peuvent également exister.

— *Les diagrammes complexes.* — Dans certains cas on peut rencontrer des diagrammes très complexes tels ceux présentés sur les figures I-74 et I-75. On constate qu'à l'état solide des transformations identiques à celles étudiées lors de la transformation liquide-solide peuvent apparaître. Elles prennent dans ce cas le nom d'*eutectoïde* et de *péritectoïde*.

— *Les lacunes de solubilité.* — Jusqu'à présent on a

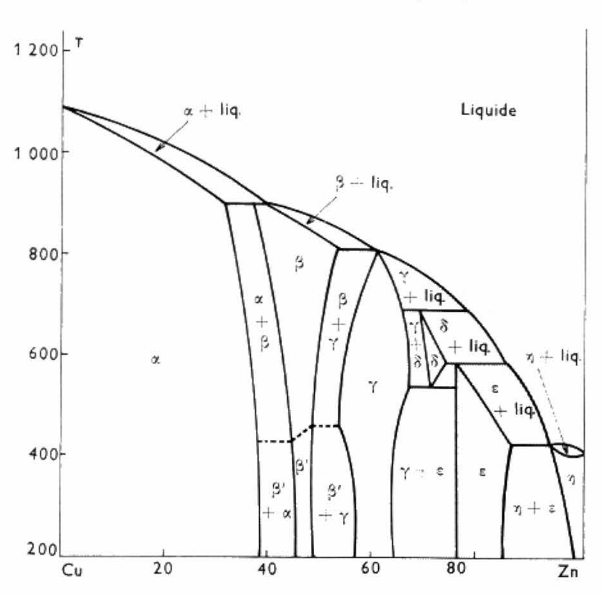


Fig. I-74 — Diagramme Cu-Zn. Ordonnées : températures (degrés Celsius) ; abscisses : concentration en atomes du zinc

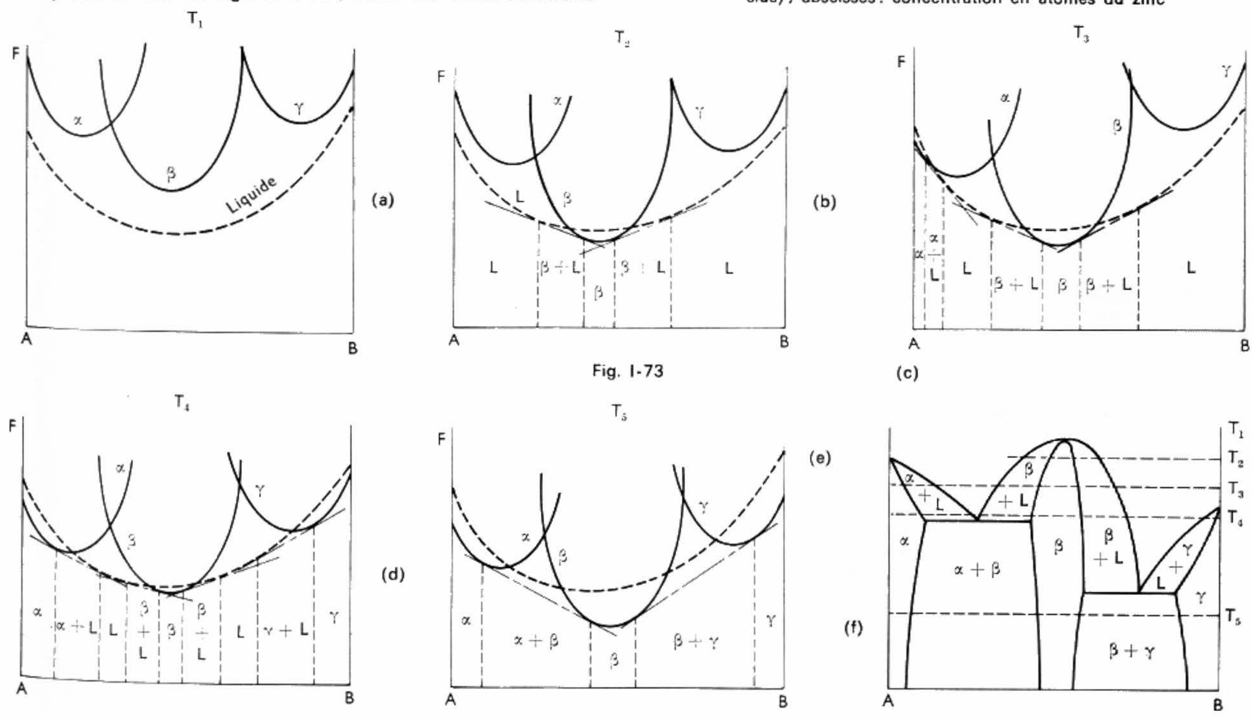


Fig. I-73

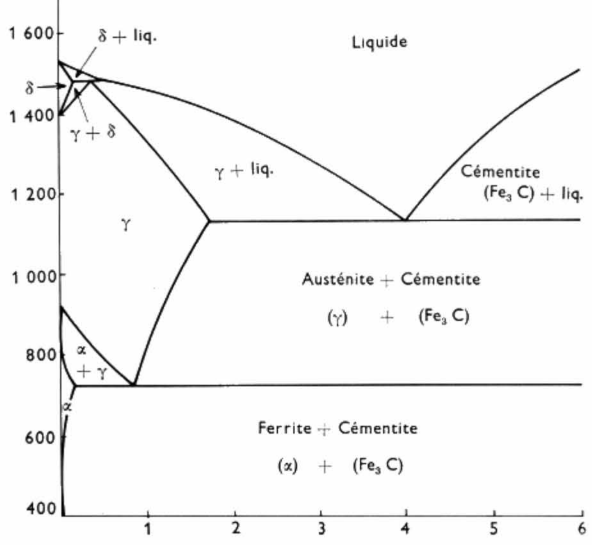


Fig. I-75 — Diagramme fer-carbure de fer. Ordonnées: températures (degrés Celsius); abscisses: concentration en carbone

admis implicitement que les métaux à l'état liquide sont solubles en toutes proportions; en réalité ce n'est pas toujours le cas, et on rencontre quelquefois des alliages où il existe des solutions liquides dont l'une est riche en élément A et l'autre en élément B (exemple: alliages plomb-cuivre). Cependant, lorsque la température s'élève, la solubilité croît et au-delà d'une certaine température on observe en général une solution liquide unique (fig. I-76).

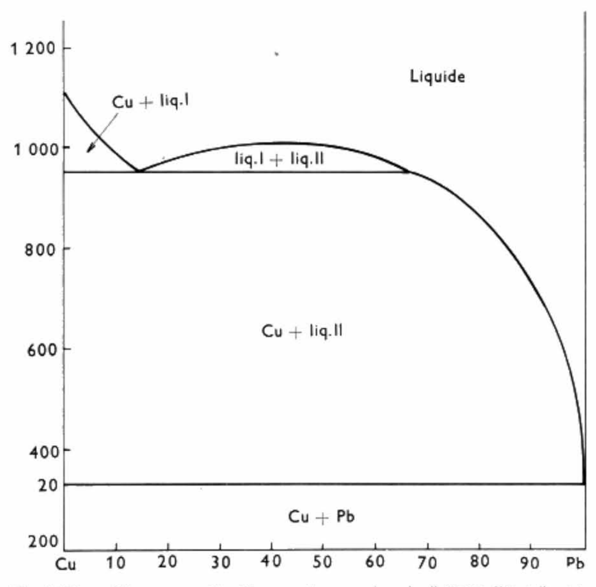


Fig. I-76 — Diagramme Cu-Pb avec lacune de miscibilité à l'état liquide Ordonnées: températures (degrés Celsius); abscisses: concentration en plomb

2° *Utilisation des diagrammes d'équilibre.* — Les diagrammes d'équilibre possèdent certaines propriétés qui permettent une large application aux problèmes pratiques. Pour ce faire, il est nécessaire de préciser un certain nombre de règles.

— *La règle des phases.* — À pression constante, la structure d'un alliage binaire AB est définie par la température T et par la composition C_x de la ou des phases qui le composent. Si l'on considère un alliage dont le point représentatif est supérieur à T, on voit que, dans un certain domaine, il est possible de faire varier la température et la composition sans qu'une structure nouvelle apparaisse dans l'alliage. L'équilibre est dit *bivariant*. Dans le cas d'un alliage à deux phases α et β, les variables sont T et les compositions C_α et C_β des deux phases. Si l'on fixe T, C_α et C_β sont déterminées; de même si l'on fixe C_α, les paramètres T et C_β sont fixés: il n'y a donc qu'une seule variable indépendante. L'équilibre est dit *monovariant*. Ces considérations peuvent être exprimées simplement par la loi des phases ou *loi de Gibbs :*

$$V = C + p - \varphi$$

V s'appelle la *variance*: c'est le nombre de paramètres ou de variables indépendantes que l'on peut choisir pour déterminer l'équilibre du système; C est le nombre de constituants indépendants (dans un alliage binaire, il y en a deux); p est le nombre de facteurs thermodynamiques, il y en a deux: la température et la pression mais, en métallurgie courante, on néglige fréquemment la pression; φ est le nombre de phases en présence.

— *Définition des concentrations.* — Si un alliage contient une masse m_A d'élément A et une masse m_B d'élément B, sa concentration en masse respectivement selon A et B est égale à:

$$C_A = \frac{m_A}{m_A + m_B} \text{ et } C_B = \frac{m_B}{m_A + m_B} \text{ avec } C_B = 1 - C_A$$

Dans les considérations qui viennent d'être développées, on a utilisé les concentrations en atomes. Si n_A est le nombre d'atomes de A et n_B le nombre d'atomes de B, on peut écrire que les concentrations en atomes de A et de B sont respectivement:

$$C^*_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \text{ et } C^*_B = \frac{n_B}{n_A + n_B}$$

Il est possible d'établir une relation entre la concentration en masse (ou en poids) et la concentration en atomes. En effet, $\mathcal{N}$ étant le nombre d'Avogadro, M_A et M_B désignant respectivement les masses atomiques de A et B, une masse m_A contient $\frac{\mathcal{N} m_A}{M_A}$ atomes de A et une masse m_B, $\frac{\mathcal{N} m_B}{M_B}$ atomes de B. On a donc:

$$C^*_A = \frac{C_A M_B}{C_A M_B + C_B M_A} \text{ et } C^*_B = \frac{C_B M_A}{C_B M_A + C_A M_B}$$

La figure I-77 montre une méthode graphique de calcul également utilisée.

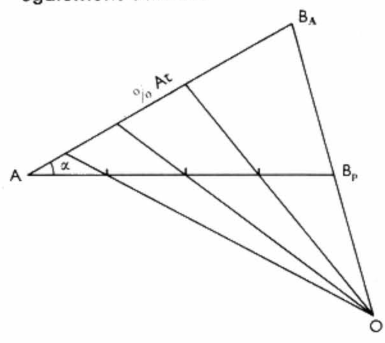


Fig. I-77

$AB_A = AB_P$

$\frac{OB_A}{OB_P} = \frac{M_A}{M_B}$

α quelconque

Les concentrations en masses sont lues sur le segment AB_P convenablement gradué.

Les concentrations atomiques correspondantes sont lues sur le segment AB_A

— *Règle des segments inverses.* — À une température donnée, il est utile de connaître non seulement la nature et la concentration des phases en présence mais également leurs proportions respectives. Soit M la masse totale d'un alliage de concentration moyenne C_0, m_α la masse de la phase α et m_β la masse de la phase β:

$$M = m_\alpha + m_\beta \text{ et}: C_0 = \frac{M_B}{M}$$

La masse totale de B est constante $M_B = M.C_0$; elle est égale à la somme de la masse de B contenue dans α et de la masse de B contenue dans la phase β:

$$M_B = M.C_0 = m_\alpha C_\alpha + m_\beta C_\beta$$

or: $m_\beta = M - m_\alpha$

et: $MC_0 = m_\alpha C_\alpha + (M - m_\alpha) C_\beta$

d'où: $\frac{m_\alpha}{M} = \frac{C_0 - C_\beta}{C_\alpha - C_\beta} = \frac{C_\beta - C_0}{C_\beta - C_\alpha}$

Sur le diagramme (fig. I-75): $C_\alpha = TA$, $C_\beta = TB$ et $C_0 = TK$

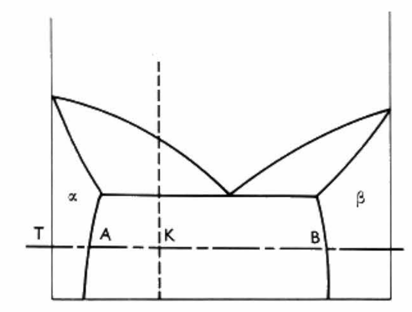
Par suite: $\frac{m_\alpha}{M} = \frac{TB - TK}{TB - TA} = \frac{KB}{AB}$ et $\frac{m_\beta}{M} = \frac{KA}{AB}$

Donc: $\frac{m_\alpha}{m_\beta} = \frac{KB}{KA}$



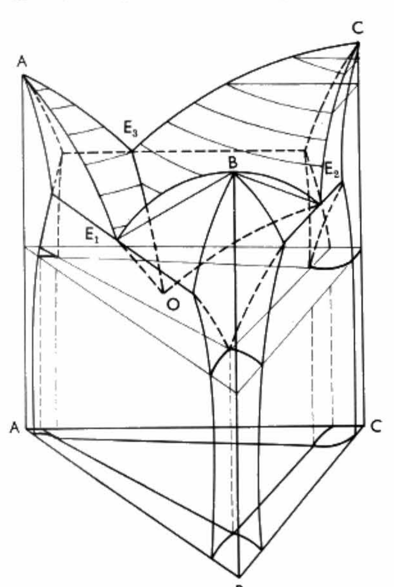
Fig. I-78

Règle des segments inverses



Les masses de α et de β sont donc respectivement proportionnelles aux segments *KB* et *KA* ; c'est la raison de la dénomination de règle.

3° *Extension des diagrammes d'équilibres.* — Pour d'évidentes raisons de commodité, on a établi les démonstrations en considérant uniquement les alliages binaires. En réalité, les alliages industriels comprennent souvent un nombre plus élevé de constituants. À titre d'exemple, pour montrer la complexité que peuvent atteindre de tels systèmes, on a présenté sur la figure I-79 un diagramme d'équilibre ternaire formé de métaux qui deux à deux donnent respectivement trois diagrammes à eutectique avec solutions solides primaires. Les schémas de la figure I-80 présentent un exemple d'un volume isotherme pour un alliage quaternaire et sa projection plane.



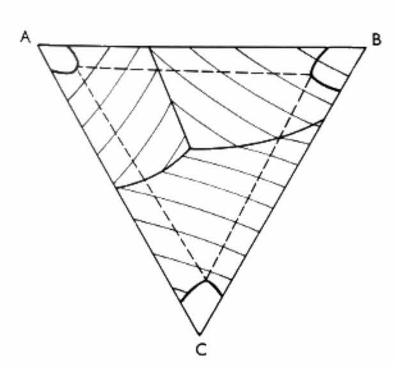
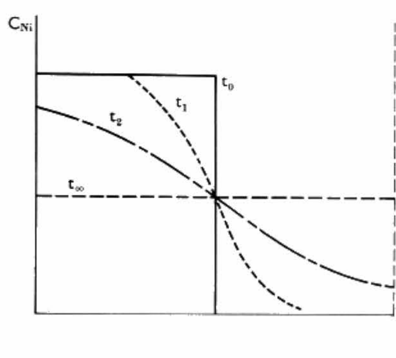


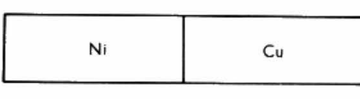
Fig. I-79

Exemple de diagramme ternaire

3.3. La diffusion.

— Lorsqu'on met en présence deux métaux purs susceptibles de former des alliages entre eux et qu'on en élève la température après avoir assuré un contact étroit, on constate qu'au bout d'un certain temps des atomes du métal *A* ont pénétré dans le réseau du métal *B*, et réciproquement : les deux échantillons métalliques sont soudés. Ce phénomène, appelé *diffusion*, a une grande importance théorique et pratique.





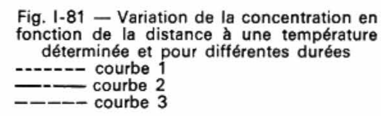


Fig. I-81 — Variation de la concentration en fonction de la distance à une température déterminée et pour différentes durées
------- courbe 1
——— courbe 2
– – – – courbe 3

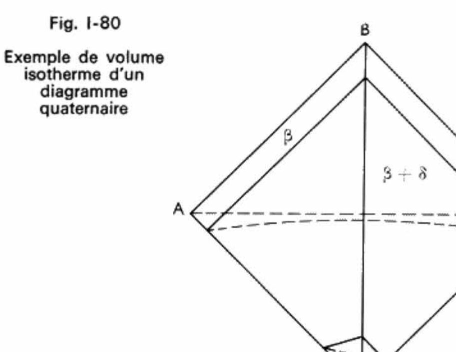
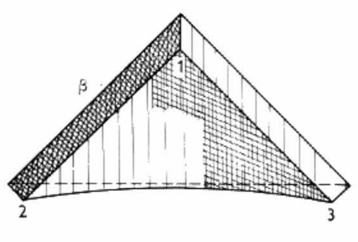
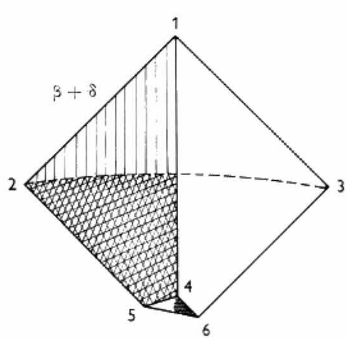
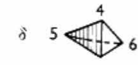


Fig. I-80

Exemple de volume isotherme d'un diagramme quaternaire







3.3.1. Lois de la diffusion

1° *Définition du phénomène.* — À l'intérieur d'un métal déterminé il est possible de faire pénétrer des atomes étrangers sur des distances appréciables, à condition que le temps et la température soient suffisants. Lorsqu'on accouple deux barreaux de métaux purs et qu'on les chauffe en respectant ces impératifs, on constate que les barreaux se soudent ; le long de l'échantillon ainsi formé la concentration de l'élément *A* dans *B* varie et réciproquement (fig. I-81). À l'instant initial, la courbe de répartition est une droite orthogonale à l'axe des barreaux : elle correspond à l'interface. Si l'on considère un couple donnant une solution solide unique au bout d'un certain temps t_1, la courbe de répartition prend l'allure de la courbe 1 ; après un temps $t_2 > t_1$, on obtient la courbe 2 ; à la limite, un chauffage très long provoquerait une homogénéisation parfaite de l'échantillon et l'on aurait la courbe 3. Si les essais sont effectués à une température supérieure, la diffusion est plus rapide. C'est le phénomène d'*hétérodiffusion*. Dans ce cas, il existe un gradient de concentration chimique : les atomes d'un élément quittent la région où ils sont en plus grand nombre pour se diriger vers celle où ils sont plus rares.

Dans un métal pur, les atomes peuvent également se déplacer de manière appréciable dans le réseau cristallin. Il est possible d'observer ce phénomène en utilisant un isotope radioactif du métal considéré (il possède les mêmes propriétés chimiques que le métal étudié). En mesurant la concentration en radioisotope au moyen d'un détecteur convenable on met en évidence un gradient de concentration de l'élément radioactif ; de la même manière on peut étudier l'influence de la température. Ce déplacement des atomes dans le réseau cristallin peut s'observer en l'absence de gradient de concentration chimique et, dans ce cas, on parle d'*autodiffusion*.

2° *Mécanismes de la diffusion.* — C'est sous l'effet de l'augmentation de l'amplitude des vibrations des atomes autour de leurs positions d'équilibre (provoquée par l'apport d'énergie thermique) que les atomes peuvent changer de position au sein du réseau cristallin. Ils se déplacent de proche en proche, par sauts successifs, d'une position d'équilibre à une autre. Les divers mécanismes théoriquement possibles dans les solutions solides de substitution sont représentés par la figure I-82. Les mouvements numérotés 1, 2 et 6 sont possibles avec des atomes qui échangent leur place dans un mécanisme coopératif. Ces mécanismes sont les moins probables car ils supposent un mouvement simultané de plusieurs atomes et une énergie d'activation plus grande. Dans le cas de l'atome du soluté placé en insertion, il est nécessaire de tenir compte du rayon atomique ; compte tenu de l'énergie de distorsion du réseau ce mode de migration est également peu probable. Au contraire, le mécanisme 3 est celui qui requiert l'énergie d'activation la plus faible ; en effet, le réseau contient toujours un grand nombre de lacunes à l'état d'équilibre et dans le voisinage d'un atome il se trouve toujours une lacune dans laquelle il peut se placer. Évidemment la position qu'occupait l'atome est devenue celle d'une lacune : tout se passe comme si atomes et lacunes se déplaçaient. Ce mécanisme est celui qui est expérimentalement vérifié. Le déplacement de l'atome est aléatoire : en effet un autre atome voisin aurait pu se déplacer s'il avait possédé l'énergie d'activation suffisante ; la diffusion est donc un phénomène statistique.

Fig. I-82

Mécanismes de la diffusion

3° *Lois de Fick*

— *Première loi de Fick.* — Elle exprime que le volume d'atomes de B, qui à l'instant t traverse un plan atomique par unité de surface et de temps, est proportionnel au gradient de concentration au niveau de ce plan. S'il y a diffusion dans le sens du gradient, c'est parce qu'il y a plus d'atomes de B dans un plan atomique 2 que dans un plan atomique 1 et que par conséquent le nombre d'atomes pouvant passer de 2 en 1 est supérieur à ceux pouvant faire le mouvement inverse si J représente le volume d'atomes B déplacés par unité de surface et de temps :

$$J = D\frac{dC}{dx}$$

— *Deuxième loi de Fick.* — La variation de concentration par unité de temps $\frac{dC}{dt}$ est proportionnelle à la dérivée du gradient de concentration $\frac{dC}{dx}$:

$$\frac{dC}{dt} = D\frac{d^2C}{dx^2}$$

(D représente le *coefficient de diffusion*).

4° *Variation du coefficient de diffusion avec la température.* — On montre que le coefficient de diffusion est égal à : $D = D_0\, e^{-Q/RT}$

Dans cette expression on désigne par Q l'énergie d'activation, par R la constante des gaz parfaits, par T la température du corps et par D_0 une constante indépendante de la température, mais fonction de réseau cristallin, des liaisons atomiques et donc, dans une certaine mesure, fonction indirectement de la concentration. Cette constante est appelée *facteur de fréquence*. L'influence de la température est considérable ; à titre d'exemple, le coefficient de diffusion du carbone dans le fer passe de 10^{-13} cm²/s à 10^{-6} cm²/s lorsque la température passe de 100 °C à 800 °C.

5° *Application des lois de Fick.* — Au moins théoriquement les lois de Fick permettent de déterminer la concentration des éléments ayant diffusé en fonction du temps et de la température. Les solutions des équations de Fick dépendent des conditions aux limites. Cependant leur intégration est souvent difficile, et les résultats ne sont qu'approchés. En effet, en première approximation on a admis que D est indépendant de la concentration, ce qui n'est pas rigoureusement vrai. En outre, on a supposé que la diffusion se fait absolument au hasard, que les vitesses de diffusion de A et de B sont identiques et que le matériau est isotrope au point de vue de la diffusion. De plus, ces hypothèses impliquent que les lacunes sont parfaitement réparties au hasard, aussi bien près des atomes de A que près des atomes de B, ce qui impose que leurs énergies de formation sont identiques au voisinage d'un atome A et d'un atome B, que les fréquences de saut des atomes de A et B dans les lacunes sont semblables, qu'aucune lacune n'est commune à l'ensemble des atomes et qu'un atome A a indifféremment des atomes A ou des atomes B comme voisins ($2\,U_{AB} = U_{AA} + U_{BB}$).

Si $U_{AA} + U_{BB} \gg 2\,U_{AB}$, les atomes de A ont tendance à s'entourer d'atomes de B ; la tendance à l'homogénéisation étant très forte, le coefficient de diffusion calculé d'après la théorie est trop faible.

Si $U_{AA} + U_{BB} \ll 2\,U_{AB}$, il y a tendance à l'apparition des deux phases et dans ce cas, le coefficient de diffusion devient négatif (son calcul par les lois statistiques n'est plus possible).

Ces considérations impliquent que la valeur de D n'est pas conforme à la valeur théorique, mais la symétrie des courbes de diffusion n'est pas mise en cause. Celles-ci étant presque toujours dissymétriques car D n'est pas indépendant de la concentration (fig. I-83), il est donc nécessaire d'écrire la deuxième relation de Fick sous la forme que lui a donnée Matano :

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dx}\left(D\frac{dC}{dx}\right)$$

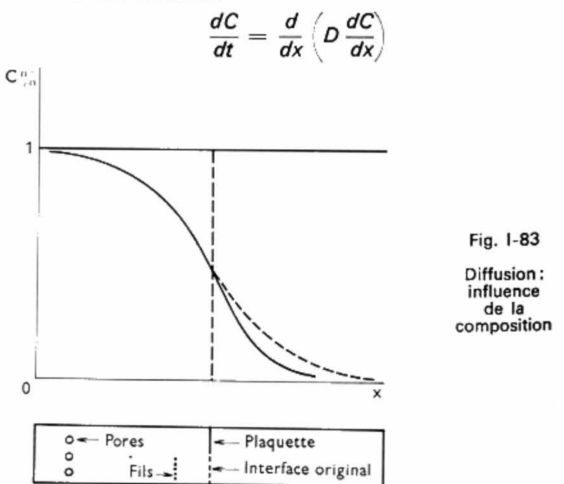


Fig. I-83

Diffusion : influence de la composition

La différence de vitesse de diffusion de deux métaux peut être mise en évidence expérimentalement. Si l'on prépare un couple de diffusion de deux métaux A et B en interposant dans le plan de séparation une plaquette de métal réfractaire ne diffusant pas et des fils très fins

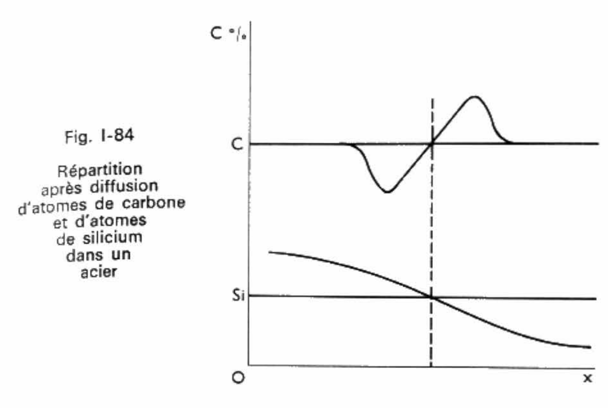


Fig. I-84 Répartition après diffusion d'atomes de carbone et d'atomes de silicium dans un acier

également inertes, on observe que la plaquette marquant l'interface reste immobile étant donné son inertie, mais que les fils se déplacent du côté d'un des deux métaux. On peut expliquer ce déplacement en admettant que les vitesses de diffusion sont différentes, les fils se déplaçant vers le métal le plus mobile. Il en résulte que le couple devrait se contracter du côté où la matière part plus vite qu'elle n'arrive. En réalité, la diffusion des lacunes étant trop lente, du côté du métal dont le coefficient de diffusion le plus grand, on observe des porosités provenant de la concentration de ces lacunes. Ce phénomène de diffusion différentielle est appelée *effet Kirkendall.* L'adjonction d'un troisième élément à un couple de diffusion perturbe le phénomène de façon importante. Les figures I-84 et I-85 montrent la répartition des éléments dans différentes conditions.

3.3.2. Conséquence des phénomènes de diffusion.

Jusqu'à présent, on n'a envisagé les phénomènes métallurgiques qu'à l'état d'équilibre; la notion de diffusion nous fait percevoir que l'état d'équilibre ne peut être maintenu dans une transformation dynamique qu'à condition que la vitesse soit extrêmement lente, ce qui est rarement le cas. Dans les paragraphes suivants on va envisager les conséquences de la diffusion sur certains de ces phénomènes.

1° *Les diagrammes hors d'équilibre.* — Lors de l'étude des diagrammes d'équilibre on a postulé que durant la solidification, la composition des cristaux solides était homogène. Cela suppose que la diffusion des cristaux de A et de B dans le solide suffisamment rapide, pour que, compte tenu de la vitesse de croissance du cristal, celui-ci reste homogène. En réalité, la solidification est en général trop rapide pour que la diffusion ait le temps de jouer totalement son rôle. Le cœur des cristaux reste plus riche en métal ou en composé le moins fusible, alors que la « peau » est en équilibre avec le liquide et a, par conséquent, la composition indiquée par le diagramme.

À titre d'exemple on considère un couple de métaux donnant une solution solide unique (fig. I-86). À la température T_2 la concentration en B, qui était de x_{s1} à T_1, est devenue x'_s au lieu de x_s prévu par le diagramme. La courbe S_1U représente l'évolution de la composition du cœur des grains; la courbe S_1b représente l'évolution de la composition de la peau des cristaux. Il est donc possible de concevoir une courbe S_1V représentant la composition moyenne des cristaux à chaque température. La courbe S_1V est appelée *solidus fictif*. Lorsque S_1V coupe la verticale x_0, la solidification est terminée, et la concentration moyenne est égale à la concentration globale. La température de fin de solidification Tj est inférieure à la température théorique T_2 donnée par le diagramme, et l'intervalle de solidification est supérieur à celui prévu par la théorie. Un cas particulier correspond à une diffusion nulle ou quasi nulle que l'on peut rencontrer lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment grande. Dans ces conditions, le liquide restant se solidifie comme s'il était à son début de solidification, sans réagir sur le cristal déjà formé. Les divers points du solidus représentent la composition des différentes couches qui se déposent lorsque la température s'abaisse. Le point figuratif du liquide se dirige asymptotiquement vers le point de fusion du métal.

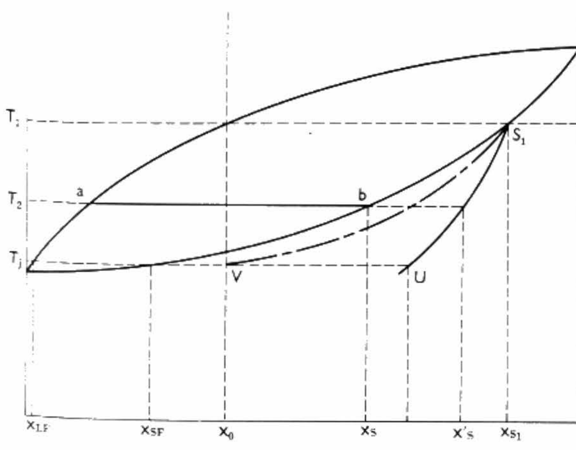


Fig. I-86 — Solidus fictif: S_1V

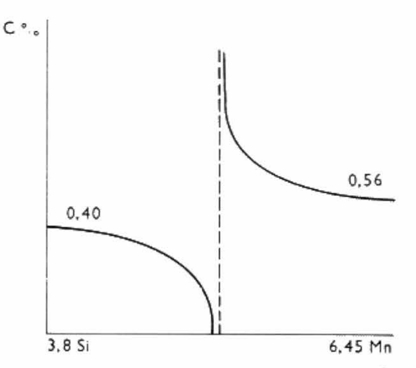


Fig. I-85 — Diffusion de silicium et de manganèse dans un acier à 0,5 % de carbone; répartition du carbone

Conséquences pratiques : L'hétérogénéité est la cause de corrosions par effet de pile et de mauvaises propriétés mécaniques. Elle provoque une perturbation des traitements thermiques et des risques de fusion prématurée lors des recuits puisque la température de fusion commençante a été abaissée. Pour éviter cet inconvénient il faut refroidir lentement l'alliage lors de la solidification et après celle-ci, et cela jusqu'à la température ambiante. Un réchauffage à T_3 aussi élevé que possible, mais inférieur à Tj, et un maintien à cette température rapprochent les deux compositions jusqu'à homogénéisation complète.

2° *Purification des métaux.* — Pour mettre en évidence cette purification on considère un échantillon cylindrique composé d'un métal A contenant une impureté B soluble qui abaisse le point de fusion; on suppose qu'elle est répartie de façon homogène et que la concentration est égale a C_0 (fig. I-87 et I-88). Si après fusion, on solidifie l'échantillon progressivement à partir d'une extrémité, la

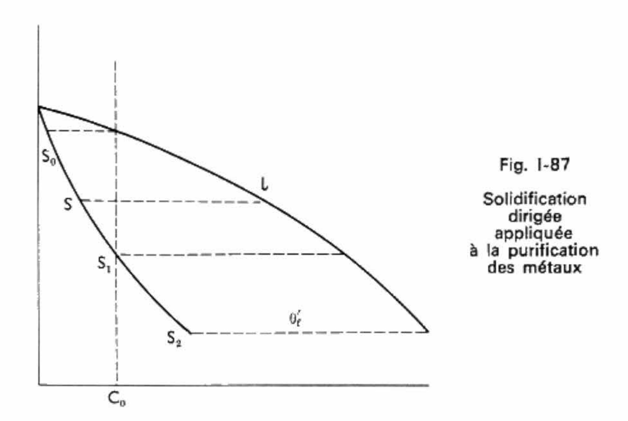


Fig. I-87 Solidification dirigée appliquée à la purification des métaux

première fraction solidifiée a la composition S_0 et est beaucoup plus pure que le liquide qui lui a donné naissance les tranches suivantes sont moins pures. À un instant quelconque de la solidification, on désigne par x la longueur

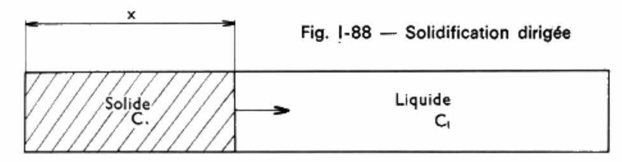


Fig. I-88 — Solidification dirigée

solidifiée, par C_l la concentration du liquide restant et par C_s celle du solide. À une température déterminée les concentrations des phases (solide et liquide) sont dans un rapport K appelé coefficient de *ségrégation* ou de *partage*. Pour l'intervalle de concentration considéré, si l'on assimile le solidus et le liquidus à deux droites on peut écrire: $C_s = KC_l$. Lorsque la solidification se poursuit, une tranche de liquide dx donne naissance à une tranche solide dx plus pure et on a l'égalité suivante: $C_l dx = C_s dx + (a - x)\, dC_l$ (a étant la longueur du barreau).

En intégrant on déduit: $C_s = \lambda\,(a - x)^{K-1}$.

Pour $x = 0$, $C_l = C_0$ et $C_s = KC_0$, d'où l'on tire λ et finalement: $C_s = KC_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{K-1}$

La variation du rapport $\frac{C_s}{C_0}$ en fonction de $\frac{x}{a}$ (fig. I-89) montre qu'une partie du barreau obtenue après solidification est plus pure, l'autre partie l'étant moins. En répétant cette opération un grand nombre de fois, on peut obtenir un

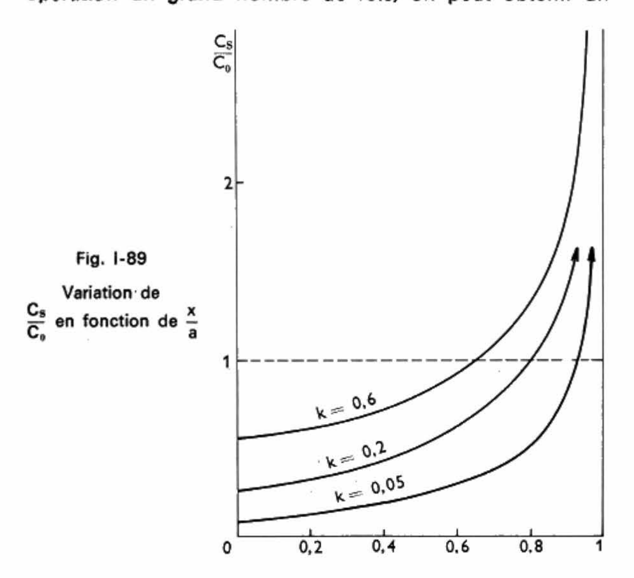


Fig. I-89
Variation de $\frac{C_s}{C_0}$ en fonction de $\frac{x}{a}$

métal A très pur. En pratique, on ne fond pas totalement le barreau en une seule opération mais on fond successivement diverses tranches de longueur l au moyen d'un four mobile étroit (fig. I-90). Tout se passe comme s'il y avait balayage

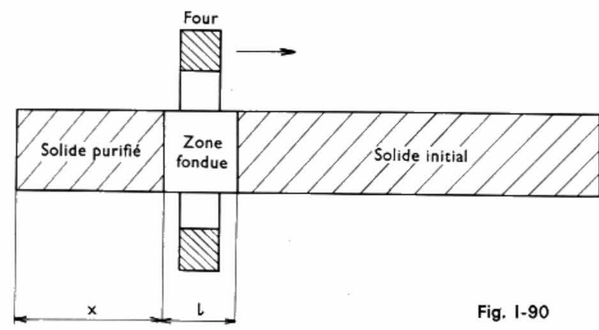


Fig. I-90

de l'impureté par la zone liquide, car, dans les conditions de l'expérience, on peut considérer que la diffusion est instantanée dans le liquide et nulle dans le solide. On peut écrire:

$$C_0 dx - C_s dx = l\, dC_l$$

en intégrant on tire:

$$C_s = C_0\,[1 + (K - 1)\, e^{-Kx/l}]$$

La concentration C_s ne dépend pas de la longueur du lingot mais du rapport $\frac{x}{l}$. Il est possible d'effectuer un nombre n de passes successives. La figure I-91 montre la variation du rapport $\frac{C_s}{C_0}$ en fonction de la valeur de $\frac{x}{l}$ pour différentes valeurs de n.

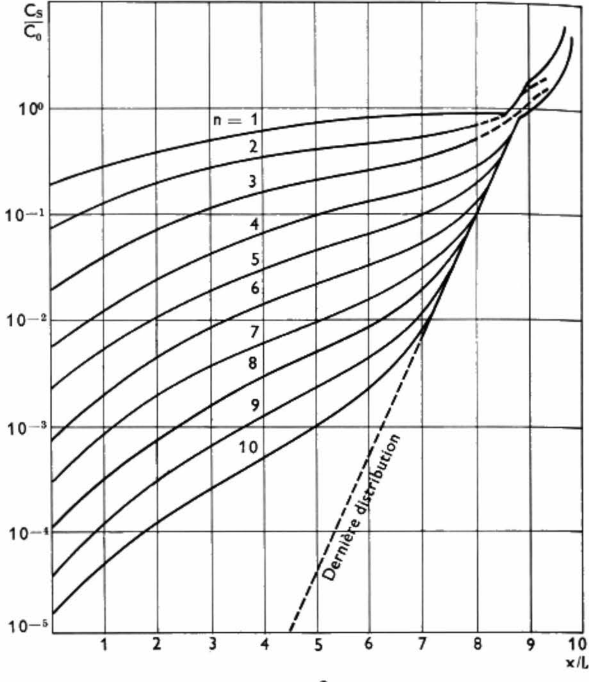


Fig. I-91 — Variation de $\frac{C_s}{C_0}$ en fonction de $\frac{x}{l}$

Cette méthode permet d'obtenir les métaux extrêmement purs ne contenant pas plus que quelques parties par million d'éléments étrangers. Elle est à la base d'une technologie destinée à la fabrication de matériaux semiconducteurs.

3° *Germination et croissance.* — On considère un alliage de concentration C_0 (fig. I-92). On suppose qu'à partir du domaine α on refroidisse l'échantillon suffisamment vite pour que, pratiquement, il ne puisse se produire aucune diffusion, à la température ambiante: on conserve la phase α sursaturée. Pour cette température ou pour une température supérieure, au bout d'un certain temps (temps

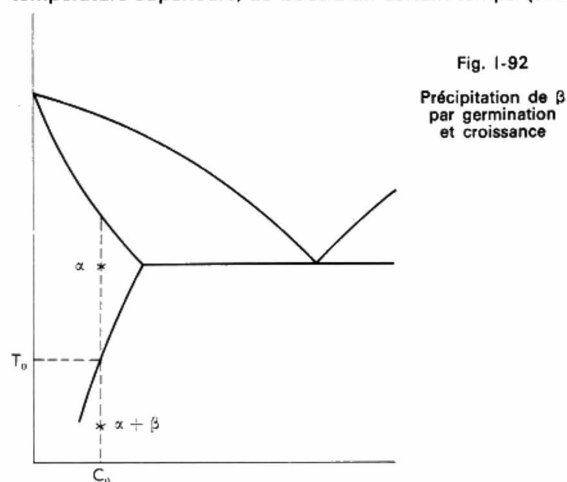


Fig. I-92
Précipitation de β par germination et croissance

d'incubation), les premiers éléments de la phase β apparaissent. Mais comme un déplacement massif des atomes ne peut se produire, le phénomène prend naissance et se développe à partir de zones préférentielles très petites, de l'ordre de quelques diamètres atomiques, appelées *embryons*. La structure stable apparaît dans ces zones et croît. Si ces embryons sont suffisamment gros, ils sont thermodynamiquement stables et ils se développent; dans le cas contraire ils sont dispersés du fait de l'agitation thermique. On démontre que pour être stable, leur rayon doit être supérieur à une valeur critique R_c telle que :

$$R_c = \frac{2\sigma T_0}{L\,\Delta T}$$

σ étant l'énergie superficielle et L la chaleur latente de transformation de la phase α en la phase β à la température T_0.

3.4. Propriétés générales des alliages. — Les propriétés des métaux purs sont affectées lorsqu'on leur ajoute un ou plusieurs autres éléments. Cette technique est largement utilisée pour obtenir des matériaux ayant des propriétés particulières. Dans ce paragraphe on n'indiquera que les tendances provoquées par l'addition d'un élément d'alliage. Les propriétés des différents alliages industriels seront données dans la partie relative à leur élaboration et utilisation.

3.4.1. Modifications de propriétés des métaux purs

1° *Propriétés mécaniques.* — L'adjonction d'un élément étranger déforme le réseau du métal solvant, et a tendance à bloquer les dislocations empêchant ainsi une déformation aisée du métal. En général, on constate que la résilience est abaissée, alors que la limite élastique, la charge de rupture et la dureté sont augmentées. Deux métaux dont les caractéristiques mécaniques ne sont pas très bonnes (tels que le cuivre et l'étain) permettent la réalisation d'alliages (les bronzes) présentant des caractéristiques mécaniques élevées.

2° *Les propriétés électriques et magnétiques.* — La présence d'éléments étrangers dans un métal pur affecte sa conductibilité car les atomes de soluté perturbent le réseau du solvant. L'action est surtout importante pour les premiers atomes mis en solution. À titre d'exemple, la figure I-93 montre la variation de la conductivité en fonction de la concentration dans un alliage binaire.

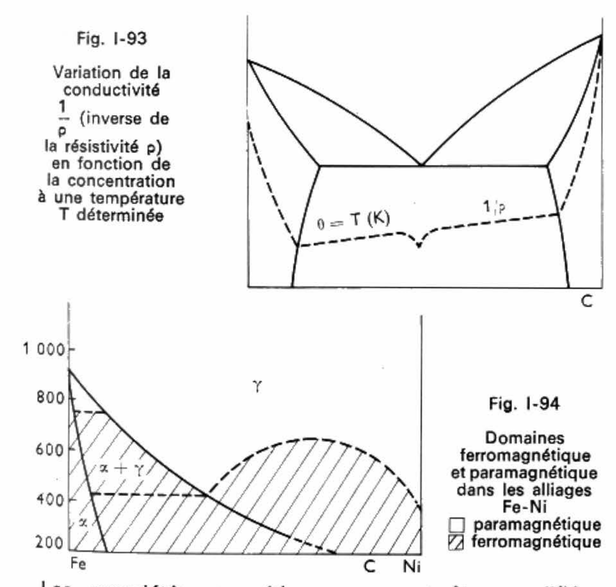


Fig. I-93 Variation de la conductivité $\frac{1}{\rho}$ (inverse de la résistivité ρ) en fonction de la concentration à une température T déterminée

Fig. I-94 Domaines ferromagnétique et paramagnétique dans les alliages Fe-Ni

Les propriétés magnétiques peuvent être modifiées selon la nature de la matrice et des éléments d'addition. On peut ainsi obtenir des alliages ferromagnétiques à partir d'éléments qui ne le sont pas (alliages 75 % Cu, 14 % Mn, 10 % Al) ou des alliages paramagnétiques à partir de deux éléments ferromagnétiques (68 % Fe, 32 % Ni) (fig. I-94).

3.4.2. Caractéristiques électrochimiques. — L'adjonction d'éléments d'addition peut modifier de façon considérable le comportement électrochimique des métaux. Cette observation a une grande importance en ce qui concerne la résistance à la corrosion des alliages.

En général, plus un métal est pur, plus sa résistance à la corrosion est grande. Cependant lorsque le métal d'apport est entièrement soluble dans le métal de base à la concentration considérée, l'homogénéité est alors excellente et la réactivité de l'alliage est plus faible que lorsqu'une seconde phase est présente. En effet, dans ce cas, le potentiel d'électrode entre les deux phases peut être très différent, et des phénomènes de corrosion rapide apparaissent. En revanche, dans certains cas, certains éléments d'addition peuvent limiter ou arrêter totalement les phénomènes de corrosion; c'est notamment ce qui est observé lorsque l'on ajoute du chrome en quantité suffisante aux alliages ferreux.

3.4.3. Traitements thermiques des alliages. — Les propriétés intrinsèques des alliages peuvent être modifiées par des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit) et leurs propriétés superficielles par des traitements thermochimiques. Le principe de ces traitements est succinctement rappelé ci-après.

Les **traitements thermiques** sont destinés à faire acquérir aux alliages métalliques des propriétés différentes de celles qu'ils possèdent à l'état d'équilibre. Les opérations sont les suivantes :

— *La trempe.* — Partant d'une structure S stable à la température ordinaire on chauffe l'alliage afin d'obtenir une structure S' stable à haute température. Ensuite on le refroidit à une vitesse suffisante pour obtenir soit la structure S', soit une nouvelle structure S'' métastable à la température ambiante.

La trempe permet d'augmenter certaines caractéristiques mécaniques (dureté, charge de rupture, limite élastique) dans le cas des alliages ferreux. Cette évolution n'est pas caractéristique de la trempe : en effet, pour certains alliages (or, cuivre, duralumin) la trempe a l'effet inverse.

— *Le revenu.* — L'alliage trempé, est maintenu durant un temps déterminé, à une température inférieure à celle de la transformation précédente. Cela a pour effet d'atténuer ou d'éliminer les tensions internes dues à la trempe, de provoquer l'apparition de nouvelles structures qui assurent des caractéristiques mécaniques différentes aux alliages (faible évolution de la dureté et de la charge de rupture des aciers mais amélioration de la résilience et des allongements ; augmentation de la dureté et de la charge de rupture des duralumins).

— *Le recuit.* — L'alliage est chauffé à une température suffisante pour obtenir la structure S' puis refroidi lentement ; cela permet le retour à une structure stable S. Le recuit détruit les effets de la trempe. Il permet l'homogénéisation d'alliages ségrégés lors du refroidissement, la destruction des effets de la trempe, la destruction des effets de l'écrouissage, la coalescence de certaines phases afin d'obtenir une plus grande malléabilité, l'affinage du grain après écrouissage.

— *La trempe isotherme.* — Dans le cas des aciers, un perfectionnement des méthodes de trempe habituelles permet d'obtenir de nouvelles structures qui présentent des caractéristiques plus intéressantes que celles des structures résultant d'une trempe et d'un revenu.

Ce traitement est basé sur la propriété qu'ont certains aciers de ne se transformer qu'au bout d'un certain temps lorsqu'ils ont été refroidis brutalement après avoir été portés à la température de trempe. En choisissant convenablement cette température (de 600 °C à la température ambiante), il est possible d'ajuster le traitement en fonction des caractéristiques désirées.

Les **traitements thermochimiques**. — Ils consistent à modifier la composition superficielle d'une pièce métallique en diffusant de la surface vers le cœur des éléments convenablement choisis. Cette opération est exécutée à température élevée durant un temps suffisant pour que la pénétration de l'élément diffusant ait atteint la valeur désirée. La concentration de la surface vers le cœur n'est pas constante, et présente un gradient qui est fonction des éléments utilisés, de la température et du temps.

Les traitements thermochimiques ont donc pour but d'obtenir des propriétés différentes à cœur et en surface de la pièce. Les traitements les plus fréquents sont les suivants :

— *La cémentation.* — C'est le traitement superficiel des aciers par le carbone. Il permet d'obtenir des pièces résilientes à cœur et qui présentent une grande dureté superficielle après trempe. Le cément peut être : solide (cément de Caron comprenant 60 % de charbon de bois, 40 % de carbonate de baryum), liquide (bains de carbonates fondus), gazeux (CO, hydrocarbures, gaz d'éclairage). La cémentation se pratique soit sur des aciers doux (contenant moins de 0,12 % de carbone), soit sur des aciers spéciaux dits de cémentation, contenant de petites additions de nickel, de chrome et de molybdène.

— *La nitruration.* — C'est la cémentation par l'azote. Sans nécessiter de traitement de trempe, elle permet d'obtenir des duretés superficielles encore plus grandes que celles résultant de la cémentation par le carbone. Le cément est en général le gaz ammoniac. La nitruration ne se pratique que sur des aciers alliés contenant de l'aluminium ou du chrome (régularisation de la diffusion de l'azote) et du molybdène (il améliore la filiation et empêche la fragilité de revenu).

— *La carbonitruration.* — C'est la cémentation simultanée par le carbone et par l'azote. Elle permet d'obtenir les propriétés liées à chacun des éléments (grande dureté, bonne filiation). Le cément est gazeux (gaz de ville, naturel ou hydrocarbure avec de l'ammoniac) ou liquide (cyanures alcalins).

— *La calorisation.* — C'est la cémentation des alliages ferreux par l'aluminium. Ce traitement permet d'obtenir des pièces présentant une bonne tenue dans les atmosphères oxydantes à chaud. Le cément est solide (poudre d'aluminium, d'alumine et de chlorure d'aluminium), liquide (aluminium fondu) ou gazeux (décomposition du chlorure d'aluminium).

— *La sherardisation.* — C'est la cémentation d'alliages ferreux par le zinc. Ce traitement permet d'obtenir une bonne tenue à la corrosion humide. Le cément est solide : zinc, oxyde de zinc et silice.

— *Autres cémentations.* — On réalise aussi la cémentation du cuivre par l'aluminium ou de l'aluminium par le cuivre afin d'améliorer la tenue à la corrosion et la dureté superficielle.

— *La chromisation.* — C'est la cémentation d'alliages ferreux par le chrome. Ce traitement permet d'obtenir une grande dureté superficielle et une excellente tenue à la corrosion à chaud.

3.4.4. Alliages industriels

1° *Normalisation.* — Tous les alliages possibles ne sont pas industriellement utilisés. Seul, un certain nombre d'entre eux sont employés pratiquement. Malgré leur nombre limité, il est nécessaire de les désigner de façon non ambiguë, afin d'éviter les confusions. Des désignations symboliques font l'objet de la norme AFNOR A 02-001.

2° *Définition succincte des familles d'alliages.* — Selon le métal de base les alliages obtenus peuvent être classés en différentes grandes familles.

a) Les **aciers** sont des alliages de fer et de carbone dont la concentration en carbone varie de 0,03 % à 1,8 %. D'autres éléments confèrent aux aciers des propriétés caractéristiques. Les différentes nuances d'acier peuvent être réparties en plusieurs catégories, telles que :

— les aciers de construction ordinaires dont la teneur en carbone est comprise entre 0,10 et 1,2 % ; sans additions volontaires ces aciers contiennent, en outre, de faibles proportions de manganèse et de silicium ;

— les aciers faiblement alliés qui contiennent 0,1 à 1 % de carbone et des éléments d'addition, Cu, Cr, Ni, Mn, V, W, Mo dont la concentration varie de 0,1 % à quelques centièmes. Ces additions leur confèrent des propriétés mécaniques remarquables ;

— les aciers spéciaux qui contiennent de 0,1 à 2 % de carbone et des éléments d'addition Mn, Cr, Ni, W, Mo, Si, V, Co dont la concentration varie de 1 à plus de 20 % selon les cas. Ces éléments leur confèrent une ou plusieurs propriétés mécaniques ou thermiques exceptionnelles, quelquefois en diminuant certaines autres caractéristiques ;

— les aciers inoxydables dont la teneur en carbone est inférieure à 0,1 %. Ils contiennent tous plus de 12,5 % de chrome (jusqu'à 20 %). Selon l'utilisation ultérieure, ils peuvent ou non contenir du nickel (la concentration varie selon les cas de 1 à 10 %). Afin d'éviter la corrosion intergranulaire, ils sont souvent stabilisés par du titane ou du nobium.

b) Les **fontes** sont des alliages de fer et de carbone dont la concentration en carbone est supérieure à 2,5 %.

— Les fontes blanches contiennent de 2,2 à 3 % de carbone et un peu de silicium. Le carbone se trouve entièrement sous forme de carbure de fer (Fe_3C) ou cémentite. Ces fontes sont extrêmement dures et fragiles ;

— les fontes grises contiennent entre 2,5 et 3,5 % de carbone et entre 1,5 et 2,1 % de silicium qui est l'élément graphitisant. Le carbone se trouve sous forme de graphite dispersé dans une matrice qui peut être ferritique, perlitique, bainitique, martensitique ou austénitique selon les autres éléments d'alliage ajoutés et les traitements subits.

Selon la forme du graphite libre, on distingue :

- les fontes à graphite en paillettes aux propriétés mécaniques médiocres, les paillettes amorçant les ruptures par effet d'entaille ;
- les fontes à graphite nodulaire où le graphite est rassemblé en petites masses irrégulières ; les propriétés mécaniques sont meilleures que celles des fontes précédentes ;
- les fontes à graphite sphéroïdal où le graphite est dispersé dans la matrice sous forme de petites sphères parfaites. On les obtient par adjonction d'un alliage de nickel-magnésium ou de cuivre-magnésium. Elles ont d'excellentes propriétés mécaniques et une capacité d'amortissement supérieure à l'acier ;
- les fontes truitées contenant simultanément du carbone libre sous forme de graphite et de la cémentite.

c) Les **bronzes** sont des alliages de cuivre et d'étain contenant de 10 à 32 % d'étain. On distingue :

— les bronzes à médaille contenant 10 % d'étain ; ils sont assez malléables ;

— les bronzes de moulage contenant 10 à 20 % d'étain,

— les bronzes à cloche contenant 20 à 32 % d'étain, et, éventuellement, un peu d'argent ; ils sont durs et sonores ;

— les bronzes spéciaux pouvant contenir les éléments suivants à des teneurs de quelques centièmes : Zn, P, Pb, Mn, Ni, améliorant certaines de leurs caractéristiques.

d) Les **laitons** sont des alliages de cuivre et de zinc contenant de 20 à 50 % de zinc. On distingue :

— les tombacs : laitons à 20 % de zinc ;

— les laitons 1er titre contenant 33 % de zinc et servant à l'emboutissage ;

— les laitons 2e titre contenant 40 % de zinc destinés au décolletage ;

— les laitons pour moulage et soudure contenant jusqu'à 50 % de zinc ;

— les laitons spéciaux dont les propriétés particulières dépendent des additions (silicium, aluminium, étain, fer, cadmium, manganèse, nickel).

e) Les **cupro-aluminiums** sont des alliages de cuivre et d'aluminium contenant de 5 à 12 % d'aluminium.

f) Les **maillechorts** sont des alliages de cuivre, de nickel et de zinc contenant de 7 à 25 % de nickel.

g) Les **monels** sont des alliages de nickel et de cuivre contenant jusqu'à 28 % de cuivre ainsi que du fer, du manganèse et du silicium dans la proportion de quelques centièmes.

h) Les **antifrictions** sont des alliages contenant en proportion variable de l'étain, du plomb, de l'antimoine et du cuivre et présentant des propriétés de frottement particulières.

i) Les **duralumins** sont des alliages d'aluminium contenant environ 4 % de cuivre, 0,5 % de silicium, 0,5 % de manganèse, 0,5 % de magnésium. Ces alliages après trempe et revenu ont des propriétés mécaniques très intéressantes.

j) Les **alpax** sont des alliages d'aluminium et de silicium (13 à 20 %).

k) Les **zamaks** sont des alliages d'aluminium et de zinc.

l) Les **zicrals** sont des alliages d'aluminium contenant du cuivre (1,5 %), du magnésium (2,5 %), du zinc (7 à 8,5 %) et du chrome (0,25 %).

4. MÉTHODES DE CONTRÔLE ET D'ÉTUDE DES MÉTAUX ET ALLIAGES

Les méthodes de contrôle des métaux et alliages sont extrêmement variées et font appel à de nombreuses méthodes physiques ou chimiques. Ces méthodes ont été classées en fonction des principes utilisés.

4.1. Méthodes optiques

4.1.1. Macrographie. — Par examen direct la macrographie permet l'observation de l'organisation structurale d'ensemble des métaux et alliages. Cette observation est pratiquée après polissage de l'échantillon et éventuellement après attaque chimique au moyen de réactifs spécifiques. Ce type d'observation comprend :

— *Le polissage :* l'échantillon est préparé par dégrossissage au back stand (toile émeri entraînée par deux cylindres) ou à la meule suivi d'un finissage au moyen de papier abrasif (de 180 à 0000).

— *L'attaque :* l'échantillon est immergé dans différents réactifs permettant de mettre en évidence les hétérogénéités physiques ou chimiques.

— *L'observation* peut être directe (avec éventuellement prise de vues photographiques) ou indirecte, par action du matériau sur un papier réactif déterminé. Les conditions sont résumées dans le tableau suivant :

Réactif	Composition		Utilisations et particularités mises en évidence
Heyn	$Cl_4Cu(NH_4)_2$ 2 H_2O H_2O	10 g 120 ml	Déplacement du cuivre. Structure de solidification.
Stead Le Chatelier	Alcool éthylique H_2O $CuCl_2$ HCl Acide picrique	100 ml 10 ml 1 g 0,5 g 2 ml	Déplacement du cuivre. Structure de solidification, dendrites. Distribution du phosphore.
Iodo Iodure	KI I H_2O	20 g 10 g 100 g	Mise en évidence des structures de déformation.
Baumann	H_2SO_4 H_2O	3 g 10 g	Formation de sulfure d'argent. Mise en évidence des ségrégations sulfureuses.
Perchlorure de fer	Perchlorure de fer H_2O		Faciès de solidification, grains des alliages cuivreux.
	Persulfate d'ammonium H_2O		Aciers inoxydables austénitiques
Trois acides	HCl HF HNO_3	33 % 33 % 33 %	Alliages légers.

Il est également possible d'utiliser un certain nombre d'acides dilués.

4.1.2. Micrographie

1° *Définition.* — C'est une observation microscopique par réflexion sur la structure microscopique des métaux et des alliages. L'observation s'effectue sur une partie d'échantillon après polissage spéculaire et attaque chimique spécifique. Le grossissement peut atteindre 2 000. L'essai comprend la prise d'un cliché photographique.

L'examen micrographique permet l'étude de la structure des métaux et des alliages, des différentes phases et de leur répartition. Par référence au diagramme d'équilibre des alliages, de cette observation on peut déduire les traitements subis en fonction du nombre, de la forme, des dimensions et de la répartition des cristaux.

2° *Appareillage.* — L'observation microscopique des métaux s'effectue au moyen du microscope métallographique (fig. I-95) qui diffère sensiblement du modèle biologique par son système d'éclairage.

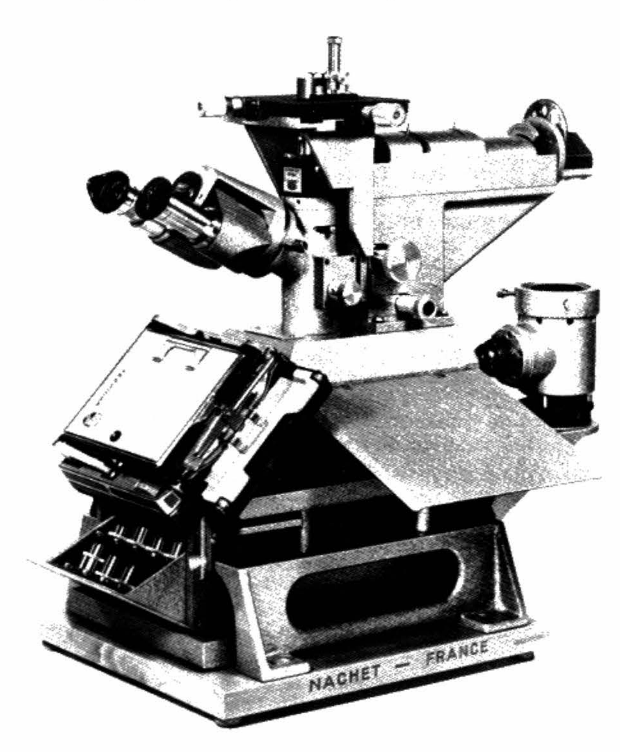


Fig. I-95 — Microscope métallographique (*Nachet*)

Le schéma de la figure I-96 indique le principe de cet appareil : un faisceau lumineux traverse un condenseur *C* et frappe une lame semi-transparente *L* ou un prisme qui le réfléchit vers l'échantillon *E*. L'image est projetée par l'objectif à travers la lame, soit sur un écran de verre dépoli *D* qui peut être remplacé par une émulsion photo-

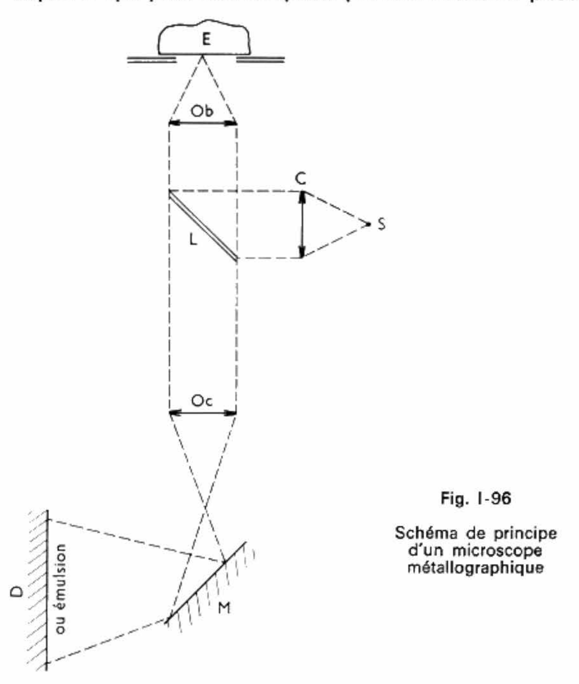


Fig. I-96

Schéma de principe d'un microscope métallographique

graphique (plaque ou film plan), soit vers un oculaire destiné à l'observation directe. L'appareil est corrigé vis-à-vis des aberrations chromatiques et des aberrations de sphéricité.

Différentes méthodes d'illuminations peuvent être utilisées afin de mettre en évidence des structures qui ne seraient pas visibles autrement : éclairage sur fond noir qui permet de mettre en évidence les parties creuses ou les parties en relief de l'échantillon, contraste de phase qui révèle les variations de couleur ou d'indice de réflexion, éclairage en lumière polarisée et examen à travers un analyseur qui permet de voir certaines hétérogénéités de composition.

Une observation micrographique est caractérisée par le grossissement G obtenu. Pour une observation à travers un oculaire, le grossissement total est égal au produit du grossissement de l'oculaire par celui de l'objectif $G = G_{oc} . G_{ob}$. Dans le cas d'une prise de vue photographique, si D est la distance de l'oculaire de projection à la plaque et d la distance de l'objectif à l'oculaire, on obtient :

$$G = \frac{G_{oc} . G_{ob} . D}{d}$$

La finesse des détails, qu'il est possible d'observer, n'augmente pas indéfiniment avec le grossissement : elle est limitée par le pouvoir de résolution de l'appareil qui correspond au diamètre du plus petit objet qu'il est possible de distinguer. Si λ est la longueur d'onde de la lumière utilisée, n l'indice de réfraction du milieu et θ l'angle d'ouverture, le plus petit diamètre $\varnothing$ qu'il est possible d'observer est égal à : $\varnothing = \frac{0{,}61\ \lambda}{n \sin \theta}$ ($n \sin \theta$ est appelé ouverture numérique de l'objectif). On voit que le pouvoir de résolution peut être amélioré par la diminution de la longueur d'onde (observation en lumière violette) et par l'augmentation de l'ouverture numérique (objectif à immersion dans l'huile de cèdre permettant d'augmenter n et θ). Les meilleurs microscopes optiques permettent de distinguer des objets d'environ 0,2 μm de diamètre.

3° *Technique opératoire.* — La préparation de l'échantillon est minutieuse, la qualité des résultats obtenus dépendant directement des soins apportés à celle-ci. Les différentes opérations sont :

— *Le prélèvement.* — Le prélèvement doit être exécuté sans échauffement ni écrouissage afin de respecter les structures sur les zones intéressantes des échantillons à observer, ces zones pouvant éventuellement être déterminées par macrographie. En général, le prélèvement est enrobé dans une résine afin d'en faciliter la manipulation lors des opérations ultérieures.

— *Le polissage.* — Le polissage est obtenu par passes successives sur des papiers abrasifs de grain décroissant en prenant soin de croiser les traits en passant d'un papier à l'autre et d'effacer totalement ceux provoqués par le papier précédent. Ces opérations sont généralement faites sous eau soit manuellement, soit au moyen de machines spéciales. Le finissage s'effectue au moyen de tourets à disque de feutre sur lesquels on a déposé un abrasif convenablement choisi (alumine, poudre de diamant, etc.). Dans certains cas, on utilise également le polissage électrolytique (fig. I-97) ou le polissage par bombardement ionique.

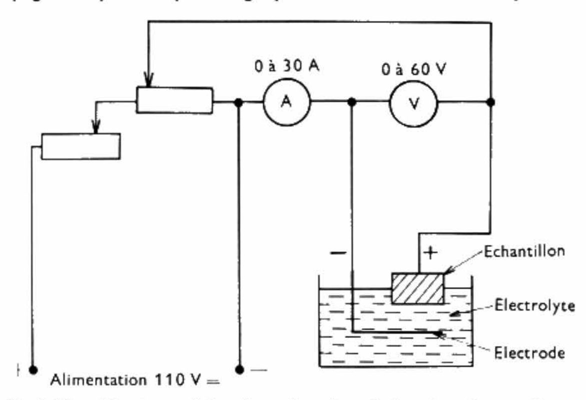


Fig. I-97 — Montage schématique d'une installation de polissage électrolytique

— *L'attaque.* — Lorsque l'on a obtenu une surface présentant un poli spéculaire, les structures sont révélées par attaque au moyen d'un réactif convenable (quelques réactifs d'attaque sont indiqués dans le tableau suivant). Après attaque, les échantillons sont lavés et séchés.

Désignation	Composition	Utilisation
Nital	Solution à 4 % d'acide nitrique dans l'éthanol	*Alliages ferreux :* attaque différentielle de la ferrite et de la cémentite
Picral	Solution à 4 % d'acide picrique dans l'éthanol	*Alliages ferreux :* mise en évidence de l'austénite
Picrate de soude	Acide picrique 2 g, soude 25 g, eau 100 g	*Alliages ferreux :* Attaque de la ferrite
Acide chromique	Acide chromique 2 g, acide sulfurique 25 ml	*Alliages ferreux :* carbures complexes
Soude oxygénée	20 ml soude à 10 % 10 ml eau oxygénée	
Permanganate	$KMnO_4$ 4 g NaOH 1 g eau 100 ml	
Ferricyanure	Ferricyanure de potassium 10 g, soude 10 g, eau 100 ml	
Benedicks	Acide métanitrobenzosulfonique 4 g, éthanol 100 g	*Alliages ferreux :* Martensite
Eau régale glycérinée	HCl 20 ml, NO_3H 10 ml, glycérine 30 ml	Aciers inoxydables
Eau régale fluorhydrique	HF 15 ml, HNO_3 5 ml, éthanol 80 ml	
Chlorure ferrique	HCl 6 ml, Fe_2Cl_6 19 g, H_2O 100 ml	*Alliages cuivreux :* laitons
Chlorure ammoniacal	Chlorure de cuivre ammoniacal 10 g, eau 120 ml	*Alliages cuivreux*
Potasse	Potasse en solution aqueuse	*Alliages légers*
Fluorhydrique	HF 10 ml éthanol 90 ml	
Nitrate d'argent	$AgNO_3$ 3 g, eau 100 g	*Antifriction*

4.1.3. Micrographie électronique

1° *Définition.* — La micrographie électronique permet d'observer la structure des échantillons par transmission d'un faisceau d'électrons à travers une lame mince ou une réplique obtenue à partir de ceux-ci. La très faible longueur d'onde associée à un électron suffisamment accéléré permet d'obtenir des pouvoirs de résolution élevés (voisins de 5 Å = 0,5 . 10^{-3} μm).

2° *Appareillage.* — Un microscope électronique est constitué d'un canon à électrons comportant un filament de tungstène chauffé à température élevée. Les électrons émis sont accélérés sous vide au moyen d'une différence de potentiel comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilovolts (fig. I-98 et V. t. 2, Microscope électronique).

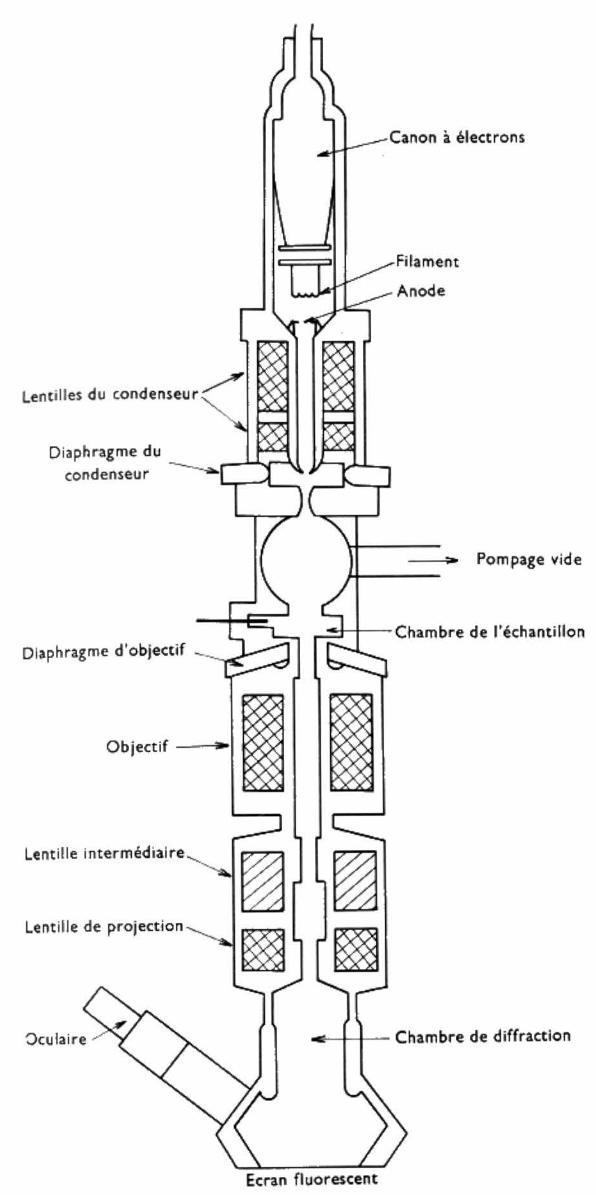


Fig. I-98 — Schéma de principe d'un microscope électronique (les lentilles sont des bobinages : lentilles électromagnétiques)

3° *Technique opératoire.* — Les électrons ne pouvant traverser que de très faibles quantités de matière, on doit effectuer les observations sur des lames extrêmement minces. Une technique consiste, après polissage et attaque, à former en surface de l'échantillon un film par évaporation d'une solution contenant une résine plastique. La réplique ainsi obtenue est « ombrée » par dépôt sous vide d'une couche d'un élément absorbant (or, par exemple) afin d'améliorer le contraste. Une autre méthode consiste à amincir une lame, d'abord par abrasion puis par polissage électrolytique, jusqu'à obtenir des spécimens dont l'épaisseur ne dépasse pas 20 μm. Le spécimen est ensuite déposé sur une grille support puis introduit dans le microscope.

En outre, les microscopes électroniques peuvent être équipés d'un certain nombre d'accessoires tels que platines chauffantes, chambres de diffraction, etc.

L'utilisation du microscope électronique s'est révélée d'une très grande utilité pour l'étude de phénomènes à l'origine de précipités submicroscopiques (durcissement structural), pour l'étude des dislocations, etc.

Le microscope électronique à balayage est également employé bien que son pouvoir séparateur soit plus limité que celui du microscope électronique ordinaire. En effet, sa grande profondeur de champ l'a rendu très intéressant dans de nombreuses applications.

4.2. Méthodes radiométriques de contrôle. — Les méthodes radiométriques de contrôle concernent l'application des rayonnements électromagnétiques de très faibles longueurs d'ondes (rayons X ou gamma) à l'étude de l'homogénéité des matériaux, de leur système cristallin ou de leur composition chimique.

Les rayonnements X ou γ se propagent en ligne droite ; ils sont plus ou moins absorbés par la matière selon l'épaisseur traversée. À un faisceau incident d'intensité I_0 traversant une épaisseur x de matière de masse volumique ρ correspond un faisceau émergeant d'intensité I égale à :

$$I = I_0 \exp(-\mu^* \rho x)$$

μ^* est appelé coefficient d'absorption massique ; il dépend de la longueur d'onde du rayonnement et du numéro atomique de l'élément dont est composé l'écran. Pour les rayons X comme pour les rayons γ, μ^* est fonction de l'énergie et du numéro atomique. Le coefficient d'absorption total d'un corps composé est égal à la somme pondérée des coefficients d'absorption des différents éléments dont il est constitué.

Les détecteurs des rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde sont de différents types. Le plus anciennement connu est l'émulsion photographique dont le noircissement dépend de la quantité de rayonnement reçue. Si l'on examine l'émulsion par transparence au moyen d'un rayonnement lumineux d'intensité i_0, le noircissement ou densité photographique) est défini par : $D = \lg \frac{i_0}{i}$. La fonction $\lg D = f[\lg(It)]$ ou caractéristique de l'émulsion est représentée figure I-99 (le produit de l'intensité I du rayonnement et du temps de pose t est appelée exposition ou lumination). La sensibilité étant approximativement

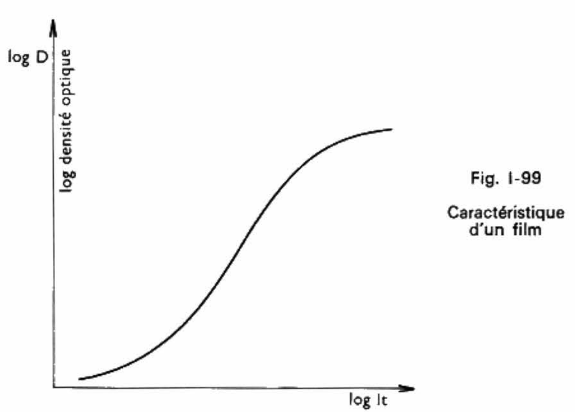


Fig. I-99

Caractéristique d'un film

proportionnelle à l'énergie absorbée, les rayonnements de grande longueur d'onde sont plus actifs que les rayonnements de courte longueur d'onde. Il est possible d'accroître la sensibilité par l'utilisation d'écrans renforçateurs fluorescents ou métalliques.

D'autres types de détecteurs basés sur l'interaction des photons et de la matière, peuvent être utilisés. Dans les scintillateurs, les rayonnements sont absorbés dans un cristal et il y a émission d'impulsions lumineuses, détectées par un tube photomultiplicateur. Ce phénomène est utilisé dans les compteurs à scintillations qui permettent de mesurer l'intensité et l'énergie des rayonnements. Dans les compteurs qui permettent la mesure soit de l'intensité des rayonnements (chambre à ionisation, compteur Geiger-Muller), soit de l'intensité et de l'énergie des rayonnements (compteur proportionnel), les particules sont utilisées pour provoquer l'ionisation de molécules de gaz se trouvant entre deux électrodes soumises à une d.d.p. déterminée. Les impulsions électriques délivrées par le détecteur sont traitées par un ensemble électronique afin d'obtenir un signal exploitable pour la mesure. Il est possible, soit d'afficher, soit d'enregistrer les résultats, ou encore de délivrer, à un ensemble d'asservissement, un signal proportionnel à la grandeur mesurée.

4.2.1. La radiographie et la gammagraphie

1° *Définition.* — Ces méthodes permettent de mettre en évidence des hétérogénéités physiques (criques, re-

tassures, porosités, etc.) ou chimiques (ségrégations majeures d'éléments de numéro atomique très différent) par absorption différentielle de rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde (rayons X : radiographie, ou rayons γ : gammagraphie) qui impressionnent un détecteur (émulsion photographique). La lecture des différences de noircissement au moyen d'un densitomètre optique permet de détecter les défauts.

2° *Principe et appareillage.* — L'objet à examiner est placé entre une source de rayonnement aussi fine que possible et une émulsion photographique. Le noircissement du film dépendant de la quantité de rayonnement reçu, on obtient un cliché qui est l'ombre de l'objet (les variations de teinte correspondent aux variations d'absorption). Ces rayons se propageant en ligne droite, la formation des ombres est identique à celle observée avec les rayons lumineux.

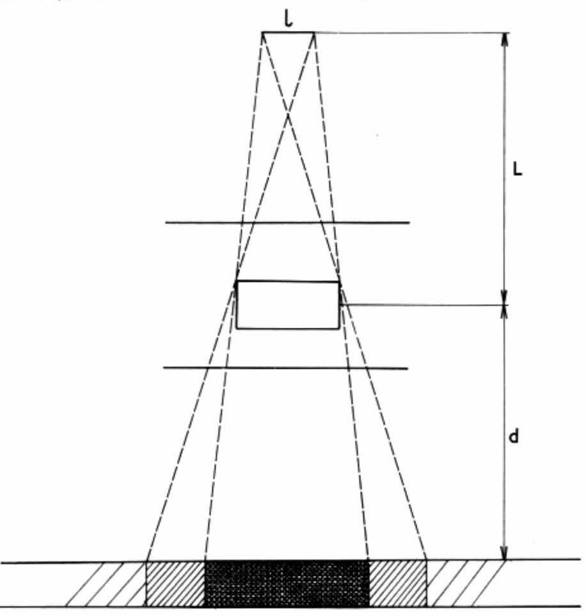
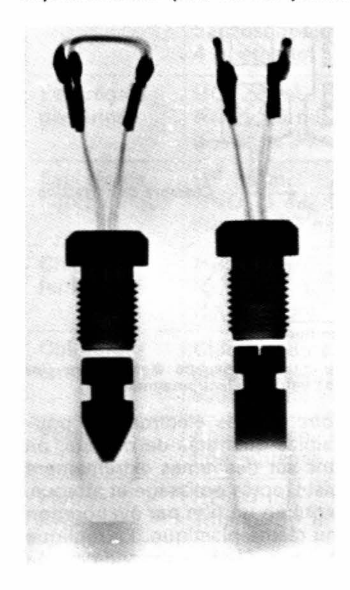


Fig. I-100 — Radiographie ; phénomène de la pénombre

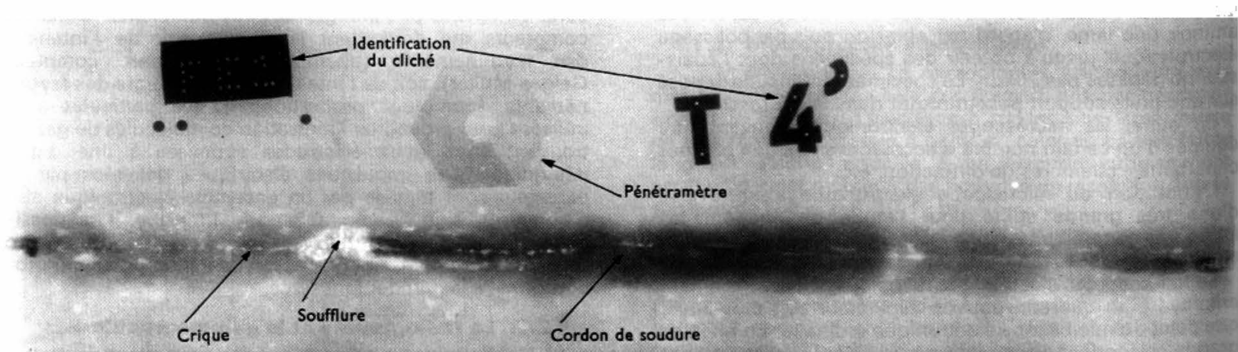
Si l'on imagine un objet présentant une cavité parallélépipédique (fig. I-100), placé à la distance L d'une source ponctuelle et à la distance d du film, le rapport de l'image à l'objet est égal à : $\frac{L+d}{L}$. Dans le cas d'une source ponctuelle, on peut obtenir une image agrandie de l'objet en le rapprochant de la source. En réalité, la source n'est jamais ponctuelle mais elle présente une largeur l, et l'ombre de l'objet est entourée d'une pénombre dont la largeur est égale à : $\frac{ld}{L}$. Pour diminuer la pénombre, il faut diminuer d qui ne peut cependant être inférieur à l'épaisseur de l'échantillon, l étant fixe pour une source donnée. La pénombre dépend surtout de L mais on ne peut trop l'augmenter car l'éclairement de l'objet varie comme $\frac{1}{L^2}$ et le temps de pose doit être augmenté. Il est toujours nécessaire de trouver un compromis entre le temps de pose et le flou acceptable du cliché. Le pouvoir séparateur du cliché correspond à la distance minimale nécessaire entre défauts pour séparer deux pénombres. Le contraste correspond à la plus petite variation d'épaisseur dh détectable. On montre qu'il est indépendant de l'épaisseur h de l'objet à condition que l'on se trouve dans la partie linéaire de la caractéristique. Pour respecter cette condition, sans avoir recours à des temps de pose prohibitifs, il faut que l'intensité I du rayonnement ait une valeur minimale. La sensibilité $\frac{dh}{h}$ est indépendante de l'épaisseur et de la nature de l'objet ; elle est d'autant plus grande que la pente de la caractéristique est importante et que la longueur d'onde est grande. En pratique la sensibilité est voisine de 2 %.

Ces considérations permettent de comprendre pourquoi, compte tenu des temps de pose acceptables on choisit la radiographie pour les éléments légers ou de faible épaisseur, et la gammagraphie pour les éléments lourds ou très épais. Dans ce dernier cas, il est possible de choisir encore entre différentes sources radioactives thulium 170 (80 keV), iridium 192 (300 keV), césium 137 (660 keV), cobalt 60 (1 250 keV), et pour chacune entre des sources de différentes activités (c'est-à-dire qui fournissent des flux de photons d'intensités différentes) en fonction des conditions de contrôle.

Il est également possible d'utiliser certaines particules comme les neutrons pour réaliser de tels contrôles. À l'inverse des rayonnements électromagnétiques, ces particules permettent la mise en évidence des éléments ou composés caractérisés par une grande section efficace aux neutrons comme les composés hydrogénés (matières plastiques, explosifs, etc.) qui sont transparents aux rayons X ou γ dans les éléments très absorbants pour ces mêmes rayonnements (fer, cuivre, plomb, étain, etc.).



Neutrographie
Parties noires : matière plastique
Parties claires : métal



Gammagraphie de soudure

4.2.2. Analyse cristalline

1° *Définition.* — L'analyse cristalline permet l'étude des réseaux cristallins par diffraction de rayons X. Selon les paramètres considérés, différentes méthodes peuvent être utilisées. Ces méthodes extrêmement fructueuses permettent de déterminer entre autres : le type de cristallisation, les paramètres de la maille, les limites de solubilité, l'orientation des cristaux et la texture des agrégats polycristallins, la nature et le degré d'ordre des solutions solides, la dimension et la répartition des précipités submicroscopiques, la perfection des réseaux.

2° *Principe.* — Dans un cristal de réseau simple, si l'on considère une famille de plans réticulaires parallèles et équidistants, séparés par une distance *d*, où les atomes sont répartis régulièrement, il existe des conditions pour lesquelles les rayons X diffusés par chaque atome sont en phase (fig. I-101). Pour les atomes d'un même plan il

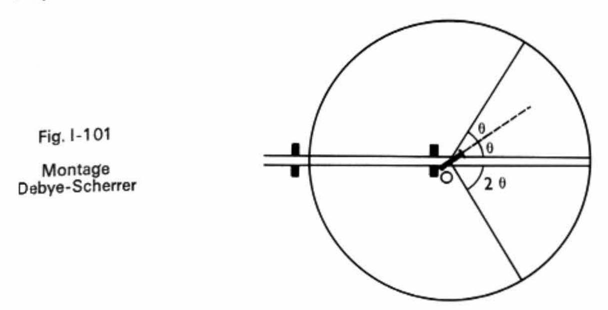


Fig. I-101
Montage Debye-Scherrer

faut que le faisceau incident et le faisceau diffusé satisfassent à la loi de Descartes (afin que les chemins optiques soient égaux). Pour que les ondes diffusées par deux plans successifs soient en accord de phase, il faut que la différence de marche entre les plans *XM* et *X'M'* soit égale à un nombre entier de longueurs d'onde (fig. I-102). Or, la différence de marche est :

$$PM' + M'P' = 2\ d\ \sin\ \theta$$

La condition est donc :

$$2\,d \sin \theta = n\lambda$$

n étant un nombre entier. Comme à une valeur de *n* correspond une réflexion d'ordre *n* qui peut être considéré comme du premier ordre pour des plans d'indice (*nh*, *nk nl*), on peut écrire $\lambda = 2\ d \sin\ \theta$. Cette relation est appelée *relation de Bragg*.

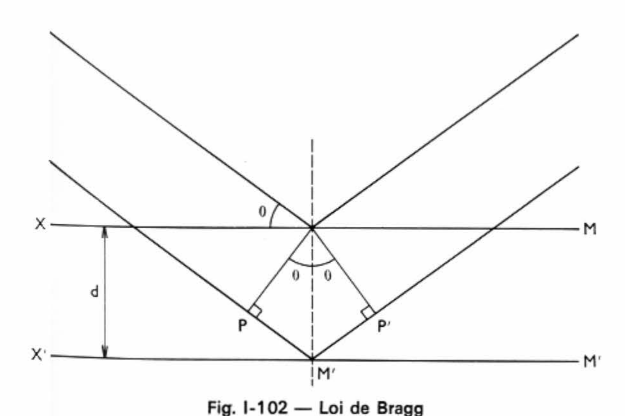


Fig. I-102 — Loi de Bragg

3° *Méthodes et mise en œuvre.* — Les méthodes principales sont au nombre de trois, on distingue :

a) La *méthode des poudres* ou *méthode Debye-Scherrer* dans laquelle un rayonnement monochromatique frappe un échantillon polycristallin (taille des cristaux de 1 à 10 µm, l'orientation des cristaux étant absolument quelconque). Dans l'échantillon se trouve un certain nombre de cristaux dont les plans d'indice (*h k l*) font l'angle θ avec le faisceau incident et dont les rayons diffractés par les plans d'une famille couvrent la surface d'un cône de révolution ayant pour axe le rayon incident et pour angle au sommet 2θ. À chaque plan réticulaire correspond un cône de rayons diffractés. Pour détecter ces rayons diffractés, on enroule un film dans une chambre cylindrique dont l'axe, normal au rayon incident, passe par l'échantillon supposé ponctuel. Sur le film développé, on observe des anneaux entiers ou des fractions correspondant à l'intersection des cônes de diffraction avec le cylindre d'enroulement (fig. I-103).

Un montage comprend, outre le générateur de rayons X, un collimateur destiné à obtenir un pinceau de rayons extrêmement fin, une chambre à l'intérieur de laquelle le film enveloppé de papier noir est appliqué (diamètre de la chambre compris entre 6 et 10 cm, hauteur 1 à 10 cm), un poste échantillon qui permet de faire tourner le bâtonnet de poudre afin d'obtenir des anneaux d'intensité uniforme malgré la taille quelquefois excessive des cristaux et leur mauvaise répartition. L'ensemble comporte également un « puits » permettant d'intercepter le faisceau direct qui risque de voiler le film, et un filtre ou un monochromateur qui permet d'éliminer une partie ou la totalité des raies parasites du faisceau incident.

Le choix du rayonnement utilisé doit être tel qu'il n'excite pas la fluorescence de l'échantillon et qu'il permette une bonne précision dans la mesure du diamètre des anneaux. S'il n'est pas possible d'éviter la fluorescence, un filtre interposé entre le faisceau et le film permet d'en diminuer les effets.

La position des raies d'un diagramme Debye-Scherrer dépend uniquement du réseau cristallin et définit la suite des distances $d_{(h,\,k,\,l)}$ présentes dans le cristal. Pour un réseau donné l'intensité des raies dépend de la base du cristal ; l'aspect des raies (net, régulier, uniforme, à secteur renforcé, ponctué, diffus) dépend de la texture cristalline c'est-à-dire de la taille et de l'orientation des cristaux. À partir des relations $\lambda = 2d\sin\theta$ et $d_{(h,\,k,\,l)} = \dfrac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$ et sachant que dans le système cubique centré toutes les raies dont la somme des indices est impaire disparaissent, que dans le système cubique à faces centrées toutes les raies dont les indices ont des parités mixtes disparaissent, il est possible d'identifier les raies et de déterminer le paramètre de la maille.

b) La *méthode de Laue* dans laquelle un rayonnement polychromatique (à spectre continu) frappe un monocristal fixe. La position du cristal étant définie, les diverses familles de plans réticulaires reçoivent les rayonnements incidents selon des angles θ déterminés et il se trouve dans le spectre une ou plusieurs longueurs d'onde satisfaisant à la relation de Bragg. Si les différents plans admettent un axe de zone (*z*, *z'*), les rayons réfléchis se trouvent sur un cône dont l'axe est confondu avec l'axe de zone, de demi-angle au sommet ψ. Chaque plan *h*, *k*, *l*, reçoit des rayonnements tels que la relation de Bragg soit satisfaite et donne naissance à un faisceau diffracté qui provoque l'apparition d'une tache sur le film (fig. I-104). Chaque tache est donc caractéristique d'un plan, sa position relative sur le diagramme est caractéristique de l'orientation de ce plan dans l'espace. Les diagrammes de Laue ne permettent aucune détermination des paramètres de la maille mais fournissent des indications importantes sur l'orientation et sur la symétrie du cristal.

c) La *méthode du cristal tournant* dans laquelle un rayonnement monochromatique frappe un cristal tournant. Lorsque le cristal tourne, à un certain moment chaque plan réticulaire fait avec le faisceau incident l'angle qui satisfait la relation de Bragg. Si l'axe de rotation est parallèle à l'axe de rotation du cristal, la figure de diffraction est simple. La méthode du cristal tournant permet de trouver les dimensions de la maille d'un cristal quel que soit son système à condition d'opérer sur un monocristal qui puisse être orienté par des méthodes purement géométriques (fig. I-105 et I-106).

4.2.3. Fluorescence X

1° *Définition.* — C'est le dosage des différents éléments des alliages par excitation de leur fluorescence X au moyen de rayons X, d'électrons, de particules β ou α. On sait que les longueurs d'onde des raies émises sont caractéristiques des éléments, leur intensité étant fonction de leur concentration.



Fig. I-103

Diagramme de Debye-Scherrer

Fig. I-104

Diagramme de Laue (sel gemme) (*Palais de la découverte*)

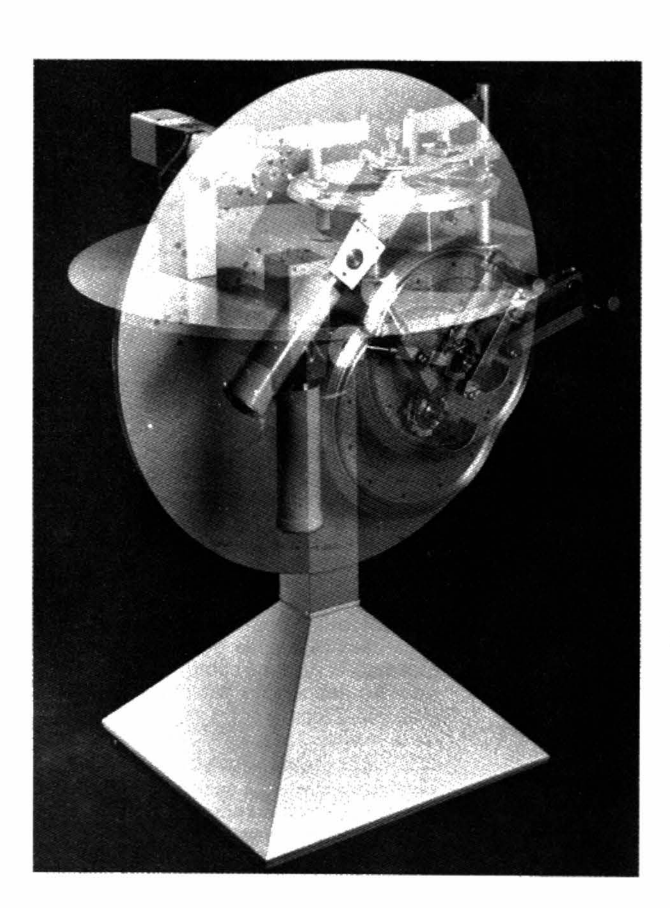


Fig. I-105

Montage universel (*C.G.R.*)

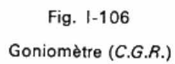
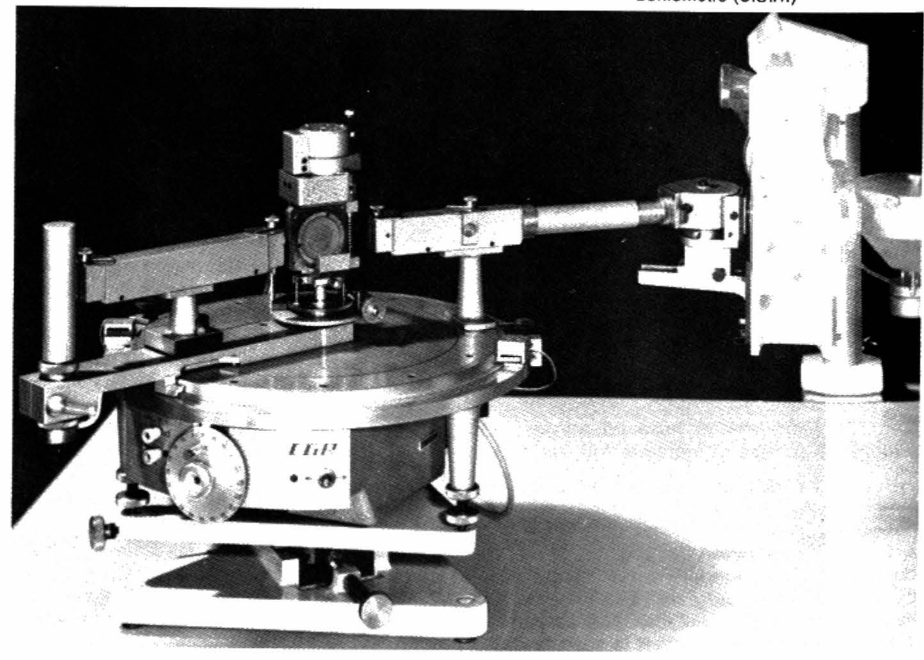


Fig. I-106

Goniomètre (*C.G.R.*)



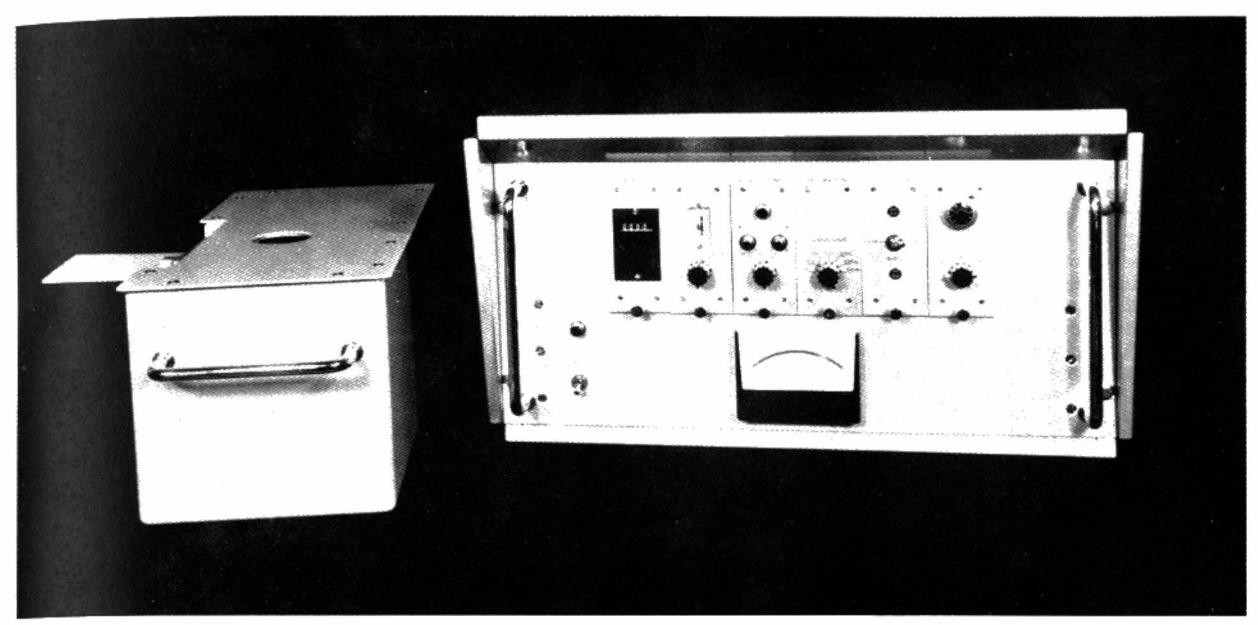


Fig. I-107 — Radioanalyseur à source

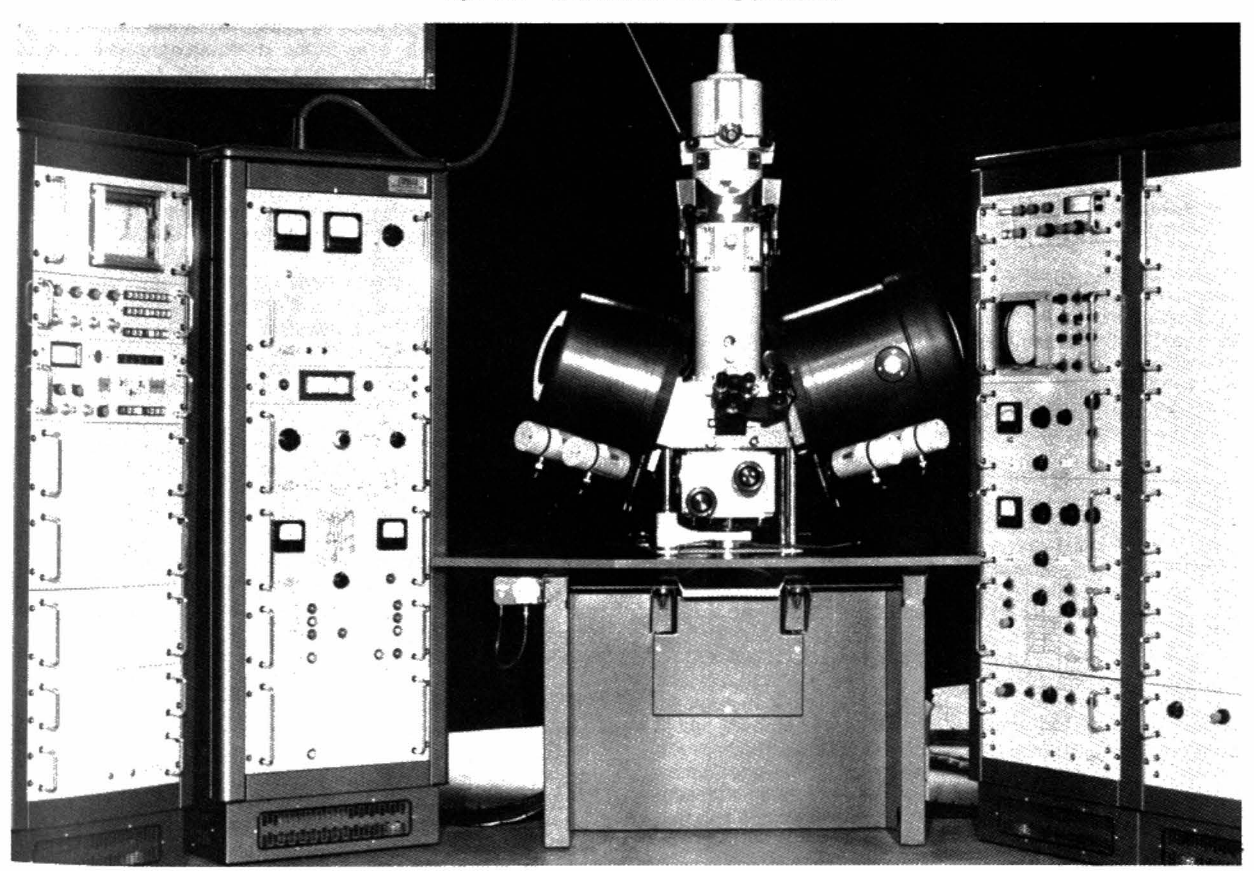
2° *Principe.* — Un électron peut être expulsé d'un atome sous l'effet d'une excitation extérieure (électrons, photons, particules β ou α), d'énergie supérieure à son énergie de liaison. Le retour de cet état excité à l'état stable se fait par chutes en cascade des électrons d'énergie inférieure sur les niveaux rendus libres ; il s'accompagne de l'émission d'une série de raies X caractéristiques de l'élément.

La spectrométrie du rayonnement de fluorescence permet d'identifier les éléments présents dans un échantillon. La mesure de l'intensité des raies, qui est fonction de la concentration des éléments correspondants, permet de les doser.

3° *Appareillage.* — L'appareillage peut être classé en fonction des modes d'excitation utilisés et des méthodes de sélection des raies.

L'excitation peut être obtenue au moyen de générateurs de rayons X à tube (le choix de l'anticathode permet d'obtenir différentes longueurs d'onde en fonction des conditions opératoires), au moyen de sources radio-isotopiques

Fig. I-108 — Microsonde de Castaing (*CAMECA*)



(fer 55, plutonium 238, cadmium 109, plomb 210, américium 241, cobalt 57).

La détection du rayonnement de fluorescence est réalisée au moyen de détecteurs tels que les compteurs proportionnels ou les compteurs à scintillations. L'analyse spectrométrique est effectuée soit par une méthode dispersive utilisant un goniomètre et un cristal diffracteur, soit par une méthode électronique (une sélection d'amplitude, permet de « trier » les impulsions électriques provenant du détecteur, la tension de sortie de celui-ci étant fonction de l'énergie du rayonnement qui a servi à engendrer le signal électrique).

Cette méthode analytique a donné naissance à trois familles d'appareils permettant d'effectuer des analyses élémentaires : les *analyseurs conventionnels* aux performances élevées (sélectivité, seuil de détection de l'ordre de la partie par million dans des conditions favorables), les *radio-analyseurs à sources* (fig. I-107) mis au point en France par Martinelli, Robert et Broquet, aux performances plus restreintes mais présentant des avantages de robustesse et de maniabilité (appareils portatifs ou portables, souvent autonomes), les *microsondes électroniques* inventées par Castaing (fig. I-108) où un faisceau d'électrons est focalisé sur l'échantillon permettant l'analyse ponctuelle (volume analysé de l'ordre de 1 m^3) pour des concentrations proche de 1 %. Il est à noter que l'apparition des microsondes électroniques a permis d'importants progrès en métallurgie durant ces dernières années.

4.3. Méthodes thermiques

4.3.1. Analyse thermique

1° *Définition.* — L'analyse thermique permet de déterminer la variation de la température des alliages en fonction du temps, soit au chauffage, soit au refroidissement. L'exploitation des anomalies des courbes obtenues sur une série d'alliages à concentration croissante, permet d'établir le solidus et le liquidus des diagrammes d'équilibre.

2° *Principe.* — Un corps est placé dans une enceinte isotherme même s'il ne subit pas de transformation, sa température varie tant qu'elle n'est pas égale à celle de l'enceinte. La perte de chaleur dQ de l'échantillon pendant une durée dt, est proportionnelle à l'écart de température

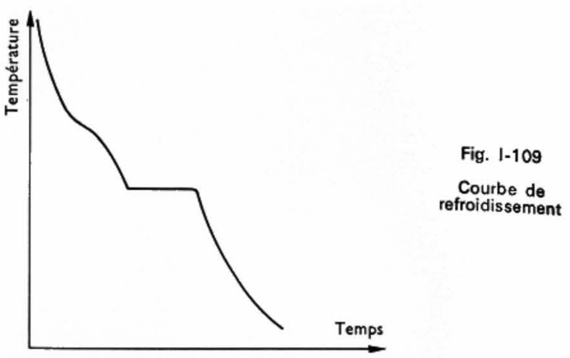


Fig. I-109

Courbe de refroidissement

ΔT entre l'échantillon et l'enceinte, et à l'intervalle de temps dt considéré :

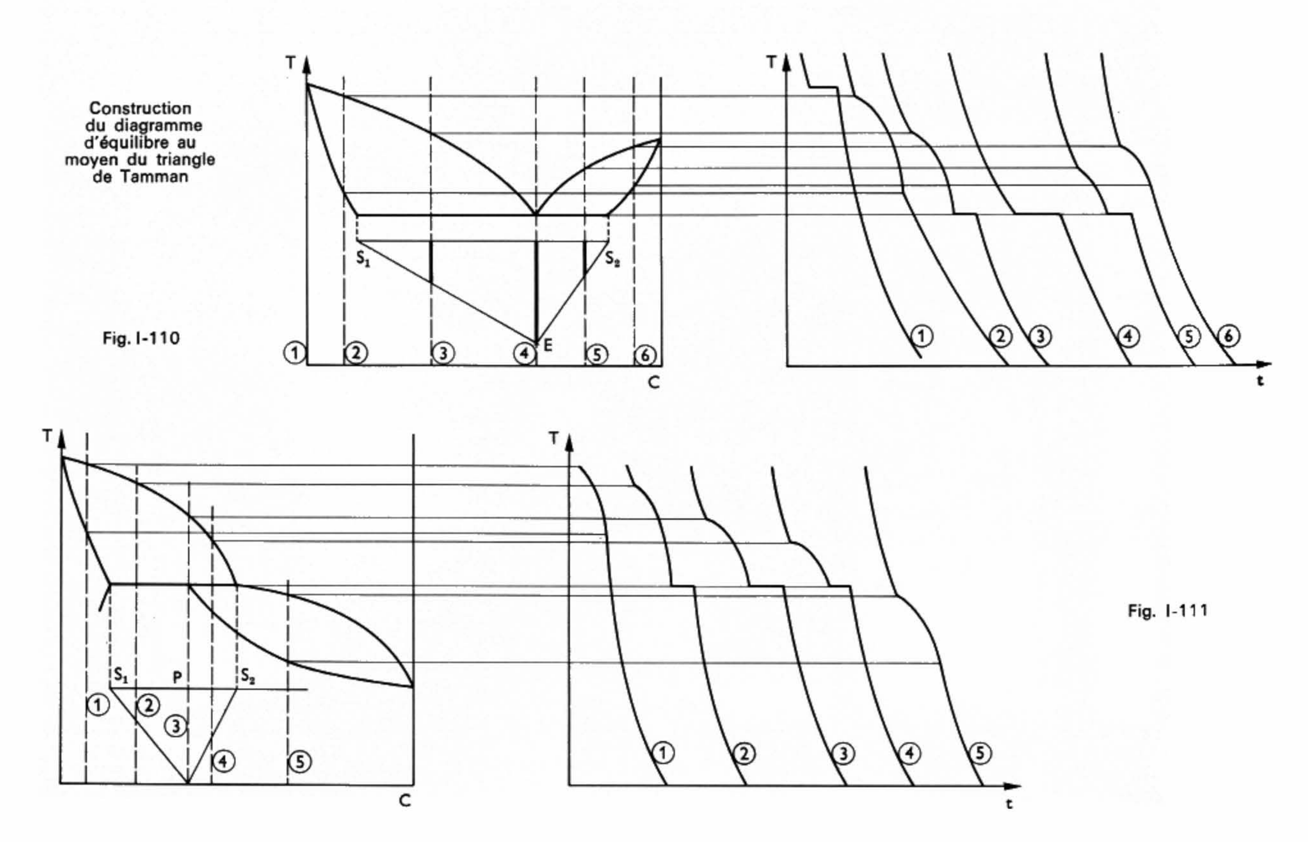
$$dQ = k\,\Delta T\,dt \qquad k = \text{Cte}$$

Pendant ce temps la température de l'échantillon varie de $d(\Delta T)$ et si c_p est sa capacité calorifique : $dQ = -c_p d(\Delta T)$.

D'où : $\dfrac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\dfrac{k}{c_p}\,dt$, et $\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\dfrac{kt}{c_p}\right)$.

S'il y a changement de phase, il y a dégagement de chaleur ; par conséquent la vitesse de refroidissement diminue et l'on observe une anomalie sur la courbe de refroidissement (fig. I-109). Si l'anomalie se traduit par un changement de pente, le phénomène correspond à une transformation à température variable (solidification d'une solution solide). Si l'anomalie se traduit par un palier, le phénomène mis en évidence correspond à une transformation isotherme (solidification d'un métal pur, d'un composé défini, point eutectique ou péritectique, etc.).

Pour déterminer le liquidus et le solidus d'un diagramme d'équilibre, on constitue une série d'alliages de différentes concentrations et on réalise l'analyse thermique de chacun d'entre eux. À partir des résultats obtenus, on construit le diagramme. On doit noter que, toutes choses étant égales, la longueur d'un palier correspondant à une transformation isotherme est proportionnelle à la quantité du constituant correspondant qui s'est formé. Pour la série d'alliage considérée, la courbe longueur de palier-composition a la forme d'un triangle (triangle de



Construction du diagramme d'équilibre au moyen du triangle de Tamman

Fig. I-110

Fig. I-111

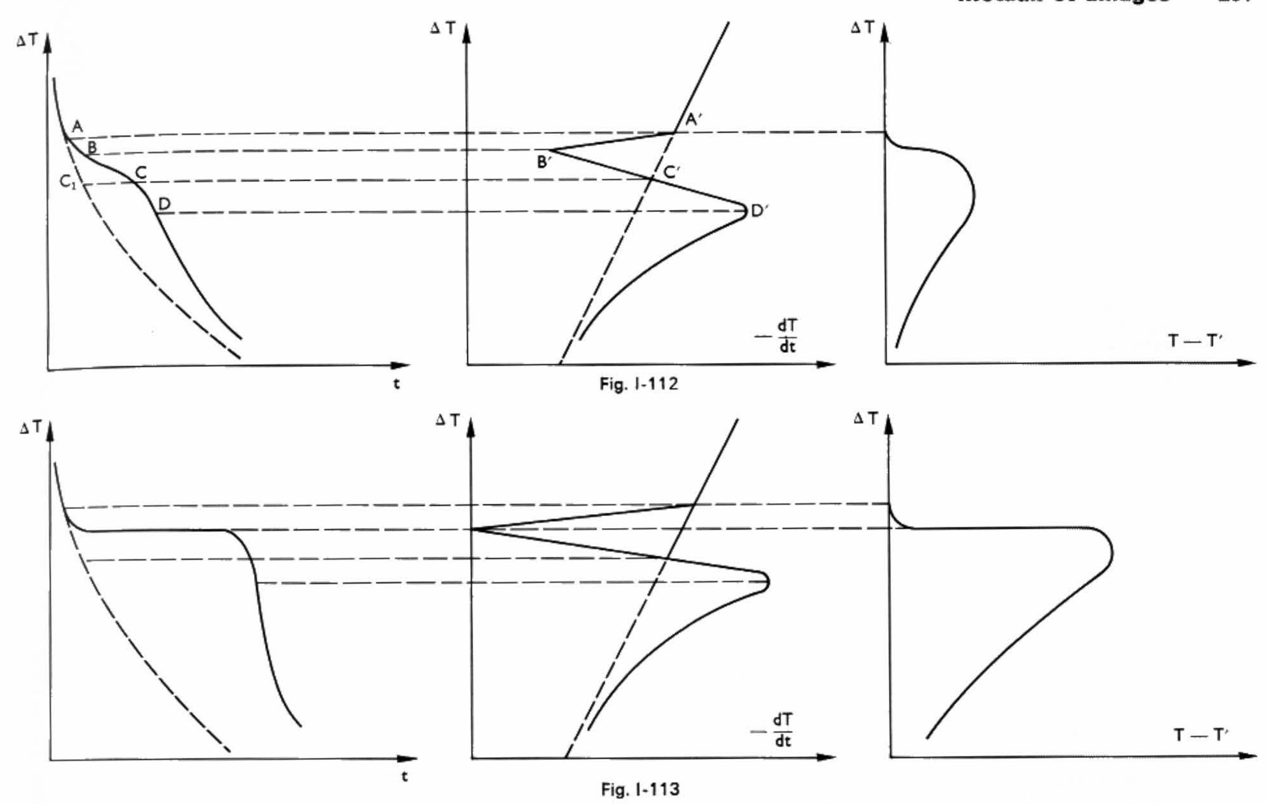


Fig. I-112

Fig. I-113

Tamman). Sa construction à partir des résultats expérimentaux permet de déterminer la composition du point singulier et les limites de l'isotherme correspondant. La détermination des températures correspondant aux anomalies permet de déterminer le liquidus et le solidus. Les figures I-110 et I-111 montrent l'application de ces principes pour la détermination de différents diagrammes binaires. On doit cependant noter que le changement de pente n'est pas toujours très perceptible.

L'exploitation des courbes de refroidissement directes n'étant pas toujours très facile. On utilise souvent la courbe température-vitesse de refroidissement $\Delta T = f\left(\frac{-d(\Delta T)}{dt}\right)$ (fig. I-112 et I-113). Elle permet de mettre en évidence les faibles anomalies thermiques. La courbe différentielle $\Delta T = f(T - T')$ où T' correspond à la température d'un étalon se refroidissant, sans anomalie de transformation et dans les mêmes conditions que l'échantillon, est la méthode la plus fréquemment employée. Très sensible, elle permet de déceler de faibles variations de température et, en outre, elle est indépendante des perturbations accidentelles (celles-ci agissent simultanément sur l'étalon et sur l'échantillon).

3° *Appareillage.* — La température est mesurée au moyen de thermocouples. La mesure de la f.é.m. des thermocouples, fonction de la température, s'obtient en général par une méthode de zéro (méthode d'opposition fig. I-114) au moyen d'un enregistreur. Un scripteur (stylet, plume, faisceau lumineux) est lié au curseur d'un rhéostat commandé par un moteur et celui-ci agit sur le curseur de telle façon que la f.é.m. délivrée par les thermocouples soit égale à une fraction réglable d'une tension fixe de

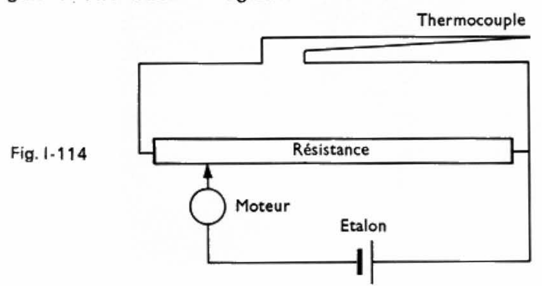


Fig. I-114

référence. Selon le cas, l'enregistrement est réalisé en fonction du temps, ou en fonction de la température.

4.3.2. Analyse dilatométrique

1° *Définition.* — L'analyse dilatométrique permet d'étudier la variation de volume ou de longueur d'un échantillon sous l'effet de la température, par mesure directe ou différentielle. De l'examen des anomalies de dilatation, on déduit les conditions de changement de structure, et on met en évidence les transformations allotropiques.

2° *Principe.* — La méthode utilisée, mise au point par Chevenard, consiste à comparer la dilatation de l'alliage considéré et celle d'un étalon en nickel-chrome (pyros) dont la dilatation est régulière, réversible et sans anomalies, dans le domaine de température considéré. Les courbes, présentées sur la figure I-115 concernent une transformation isotherme mais elles permettent de comprendre le principe utilisé.

Si l'on échauffe lentement le pyros et l'échantillon, la dilatation du pyros en fonction de la température est donnée par la courbe 1 et celle de l'échantillon par la courbe 2. La dilatation du pyros provoque le déplacement du style de l'enregistreur selon l'axe des abscisses, la dilatation de l'échantillon commande le déplacement selon l'axe des ordonnées. La combinaison des deux mouvements permet de tracer la courbe de dilatation de l'échantillon en fonction de la température.

La méthode directe est rarement utilisée et, en général, on préfère la méthode différentielle. Dans ce cas, un miroir concave *M*, éclairé par une source lumineuse *S*, est fixé sur un trépied formant un triangle rectangle en *A*, mobile autour du point fixe *B*. Le point *A* se déplace sous l'effet de la dilatation du pyros et provoque la rotation du triangle autour de l'axe *BC* ; le point *C* se déplace sous l'effet de la dilatation de l'échantillon, et provoque la rotation autour de l'axe *AB*. La variation de longueur du pyros et de l'échantillon est transmise au triangle par l'intermédiaire de tiges de silice (fig. I-116).

Les coordonnées d'un point de la courbe obtenue peuvent se calculer. Si à 0 °C le pyros et l'échantillon ont la même longueur l_0, à la température T leurs longueurs sont respectivement l et l'. Les allongements Δp du pyros et Δm de l'échantillon sont donc égaux à :

$$\Delta p = l - l_0$$
$$\Delta m = l' - l_0$$

Fig. I-115

Allongements Δp et Δm du pyros (1) et de l'échantillon de métal (2) en fonction de la température T

Courbes temps-température pour le pyros (1) et pour le métal (2)

Variation de la différence Δp — Δm en fonction de la température du pyros

Fig. I-116

L'allongement des barreaux de silice étant négligeable le déplacement d_2 du point A est égal à Δp et celui d_1 du point C à Δm.

Un point de la courbe obtenue a :

— une abscisse x proportionnelle à (d_2)

— une ordonnée y proportionnelle à $(d_2 - d_1) = d'_1$

$$x = k_1\, d_2 = k_1\, \Delta p$$

$$y = k_2\, (d_1 - d_2) = k_2 (\Delta p - \Delta m)$$

$$k_1 = \frac{2\,MO}{AB} \text{ et } k_2 = \frac{2\,MO}{AC}$$

En tenant compte de l'allongement de la silice on peut déduire le coefficient de dilatation vraie α_m du métal à une température déterminée en fonction du coefficient de dilatation α_p du pyros et α_s de la silice :

$$\alpha_m = \alpha_p + \frac{k_1}{k_2}\,(\alpha_p + \alpha_s)\,\frac{dy}{dx}$$

À titre d'exemple, la figure I-117 présente la courbe de dilatation d'un acier XC 85 (acier dur ou eutectoïde). On observe un changement de pente vers 200 °C : il correspond à la perte de magnétisme de la cémentite. À 720 °C une variation brutale se produit : elle correspond à la transformation perlite → austénite. Au refroidissement, la même transformation se produit pour une température inférieure ; l'importance de ce décalage est fonction de la vitesse de refroidissement.

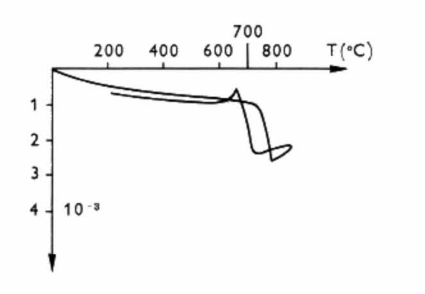


Fig. I-117

4.4. Essais mécaniques

4.4.1. Essais de traction

1° *Définition.* — L'essai de traction permet de déterminer les différents paramètres qui caractérisent la

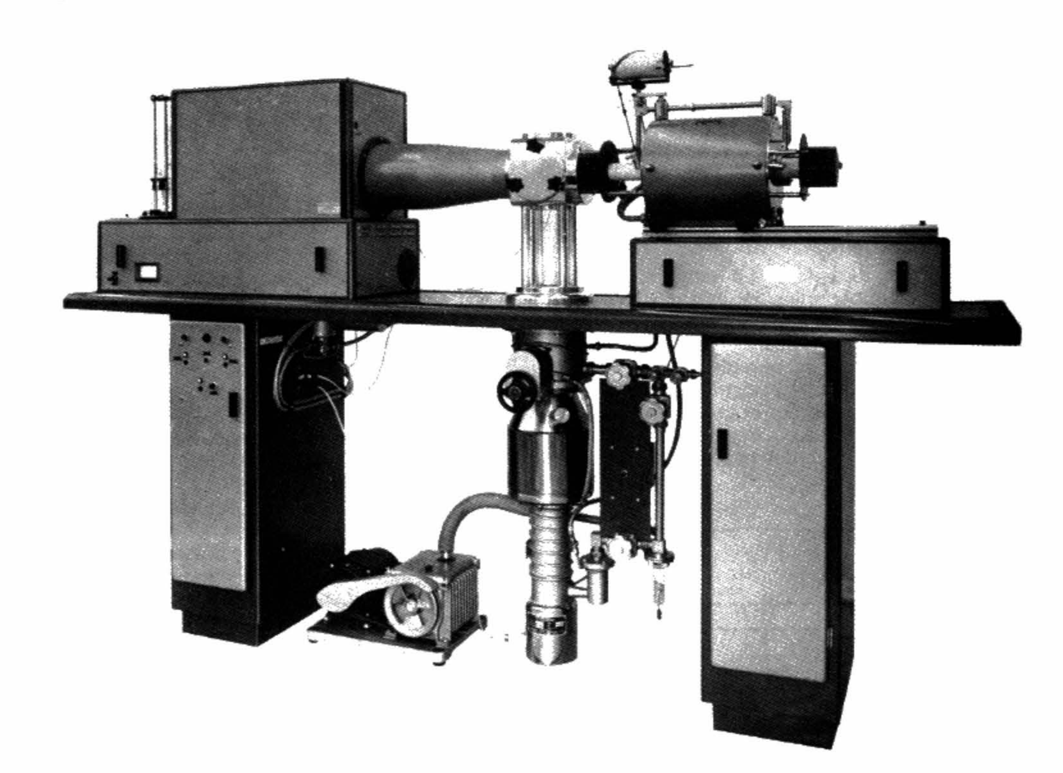


Fig. I-118

Dilatomètre enregistreur à haute température (*Borremans — A.D.A.M.E.L.*)

résistance mécanique des métaux en appliquant une charge croissante aux deux extrémités d'une éprouvette.

2° *Principe de l'appareillage et conditions de l'essai.* Les machines de traction sont constituées d'un bâti, d'un système à vis ou d'un système hydraulique permettant d'appliquer l'effort. L'intensité de l'effort est mesurée au moyen d'un dynamomètre à anneau (petites machines) ou d'un dynamomètre pendulaire à 60° (fig. I-119). La

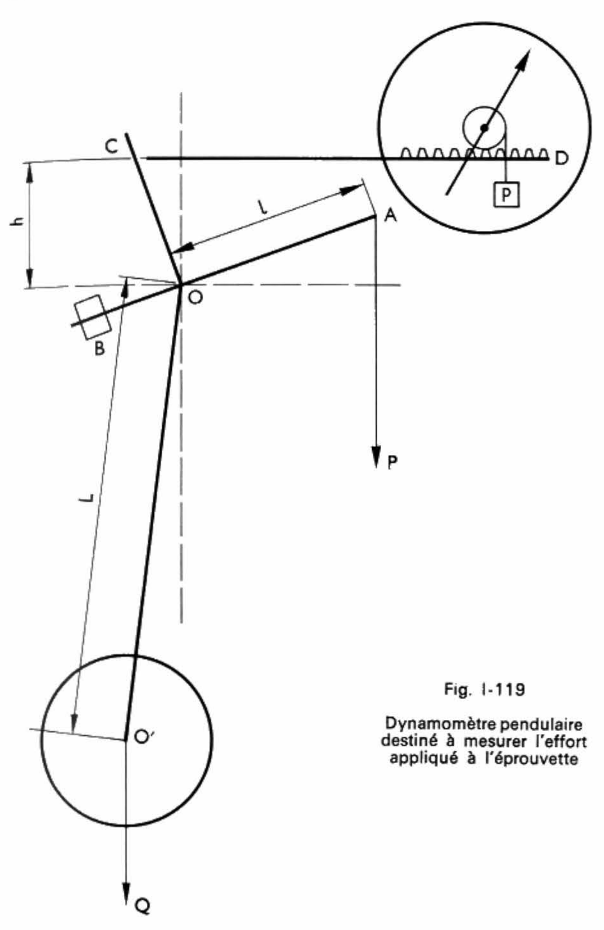


Fig. I-119

Dynamomètre pendulaire destiné à mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette

charge, appliquée au point A, sur un bras OA de longueur l, est équilibrée par un contrepoids variable Q placé à l'extrémité du bras OO', de longueur L, qui fait un angle de 120° avec le bras OA. L'indication de la charge est donnée par le déplacement d'une aiguille commandée par une crémaillère située à la distance h de l'axe O. Le déplacement Δ de la crémaillère est égal à : $\Delta = P \dfrac{2hl}{QL\sqrt{3}}$. Il est possible de faire varier la portée de la mesure en modifiant la longueur L ou la charge Q. Dans la plupart des machines, ces deux paramètres peuvent être réglés indépendamment. Une tare B équilibre le poids des pièces transmettant l'effort.

3° *Conditions de l'essai.* — Les éprouvettes peuvent être de forme cylindrique ou prismatique. Elles comportent deux têtes d'amarrage. Elles doivent être usinées en évitant les échauffements et l'écrouissage ; l'état de surface doit être parfait.

Les contraintes doivent s'exercer dans l'axe de l'éprouvette ; à cet effet, les mors sont montés sur des calottes sphériques afin que le barreau s'oriente automatiquement dans le sens de l'effort. La vitesse de l'essai doit être uniforme et égale à 25 % de la distance entre repères. Cette valeur est une valeur pratique qui réalise un compromis entre les conditions idéales (essai isotherme) et les conditions défectueuses (essai adiabatique).

La rupture doit se produire dans les deux quarts médians de l'éprouvette pour que l'essai soit valable. Le mode opératoire détaillé est décrit dans la norme française N.F. A 03.001.

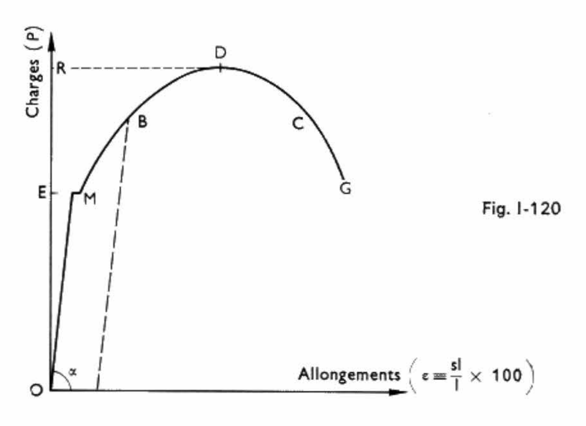


Fig. I-120

4° *Description des phénomènes observés.* — L'essai de traction s'effectue en exerçant sur les extrémités d'un barreau, et selon son axe longitudinal, un effort de traction progressivement croissant. On mesure simultanément, en les enregistrant, les valeurs des efforts et des allongements. L'enregistrement obtenu à l'allure d'une des courbes de la figure I-120. On distingue :

— Une période de déformation élastique (OM) : les allongements sont proportionnels aux efforts et si l'effort cesse, le barreau reprend sa longueur initiale.

— Une période de déformation permanente (MD) : lorsque la limite élastique est dépassée, les allongements ne sont plus proportionnels à l'effort et si l'effort est supprimé, le barreau ne reprend plus sa longueur initiale.

— Une période de striction (DG) : au-delà d'une certaine limite, la charge diminue alors que le barreau continue à s'allonger. On constate que le barreau s'étrangle en son milieu (phénomène de striction).

— La rupture (G), au-delà d'un certain allongement.

Les périodes de l'essai de traction sont plus ou moins distinctes selon la nature des matériaux essayés. Certains métaux présentent nettement ces différentes phases ; d'autres matériaux non métalliques se rompent pratiquement dès que la limite élastique est atteinte, et on ne constate alors ni allongements permanents, ni striction.

La surface délimitée par la courbe, par l'axe des abscisses et par la verticale abaissée du point correspondant à la rupture sur cet axe représente le travail nécessaire pour rompre l'éprouvette. Au moyen de cet essai, on détermine différentes grandeurs qui sont :

a) la *limite élastique,* exprimée pratiquement en décanewtons par millimètre carré ; selon les critères pris en considération, il existe quatre définitions de la limite élastique :

— la limite élastique théorique qui est la charge unitaire pour laquelle commence la déformation permanente ;

— la limite élastique pratique, ou conventionnelle, qui est la charge unitaire donnant un allongement permanent déterminé (en général 0,2 % de la distance entre deux repères pris sur l'éprouvette) ;

— la limite élastique proportionnelle qui est la charge unitaire à partir de laquelle les déformations cessent d'être proportionnelles aux efforts ;

— la limite élastique apparente que l'on n'observe que pour certains types d'alliage ; c'est la charge unitaire pour laquelle apparaissent certaines anomalies de tracé de la courbe de traction.

b) La *charge de rupture R* qui est la charge unitaire maximale supportée par l'éprouvette pendant l'essai.

c) *L'allongement* qui est l'augmentation relative de longueur de l'éprouvette pendant l'essai (exprimée en pourcentages) ramenée à la longueur initiale L entre repères : $A\,\% = \dfrac{\Delta L}{L} \times 100$. La distance L dépend de la section du barreau. La norme française définit la longueur L par rapport à la section S par la relation : $L = 8{,}16\sqrt{S}$. On considère soit l'allongement après rupture, soit l'allongement correspondant à la charge de rupture.

d) La *striction* qui est la diminution de section du barreau rapportée à la section initiale exprimée en pourcentage :

$$\varepsilon\,\% = \frac{\Delta S}{S} \times 100$$

e) Le *module d'Young* qui caractérise la capacité à la déformation élastique du matériau. Il correspond à la pente de la droite *OM* du diagramme de traction et a pour expression : $\mu = \frac{dP}{dL} \cdot \frac{L_0}{S_0}$, *P* étant la charge, L_0 la longueur initiale et S_0 la section initiale du barreau. Le module s'exprime en décanewtons par millimètre carré. Il est difficile de le déterminer directement sur le diagramme de l'essai de traction, les allongements étant faibles pendant la période de déformation élastique. En général, on amplifie les déformations au moyen d'un extensomètre à miroir. On peut également déterminer le module par la méthode des pendules liés élastiquement par l'intermédiaire de l'éprouvette ou par une méthode vibratoire. Dans le dernier cas, il suffit de déterminer la fréquence de vibration propre de l'éprouvette tenue en son milieu pour en déduire le module.

5° *Machines d'essai.* — Les machines d'essai les plus employées sont des machines statiques. Les modèles sont nombreux, la force est produite généralement au moyen de vérins hydrauliques. Les efforts sont mesurés, soit au moyen de dynamomètres pendulaires, soit au moyen de dynamomètres à anneau pour les machines de petite puissance. Elles comprennent toutes un dispositif d'enregistrement des diagrammes (fig. I-121).

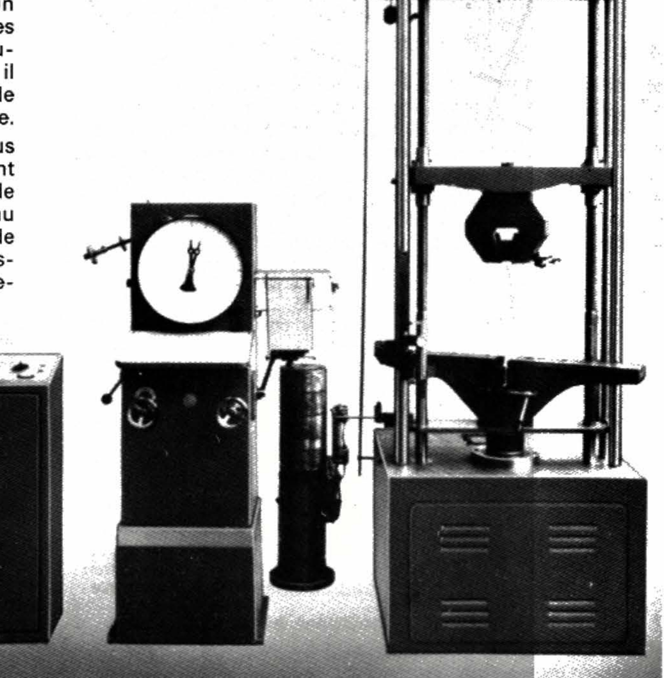


Fig. I-121

Machine de traction (*Wolpert — Testwell*)

4.4.2. Essais de dureté

1° *Définition.* — Ces essais ont pour but de déterminer la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps plus dur. La nature et la forme du poinçon, la grandeur mesurée (profondeur ou diamètre de l'empreinte) permettent de définir un certain nombre de méthodes d'essai.

2° *Principe de l'appareillage.* — Dans son principe, l'appareillage utilisé est très simple ; les machines de dureté sont essentiellement constituées d'un système de levier qui permet d'appliquer la charge (fig. I-122).

3° *Description des différents essais. — Méthode Brinell.* — L'essai Brinell consiste à appliquer une bille d'acier sur l'échantillon à étudier et à exercer un effort déterminé sur celle-ci.

Le nombre de dureté Brinell H_B (symbole normalisé) est le rapport de la charge *P* à la surface *s* de la calotte sphérique de l'empreinte produite :

$$H_B = \frac{P}{s} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2}\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

D étant le diamètre de la bille, *d* celui de l'empreinte.

Bien que les duretés soient homogènes à des pressions, elles sont souvent exprimées comme s'il s'agissait de nombres abstraits : dureté Brinell $H_B = 250$. En réalité, l'unité est le décanewton par millimètre carré (ou en hectobars). *Pour une même catégorie de métaux,* la charge de rupture *R* est proportionnelle à la dureté Brinell : $R = kP$.

Conditions de l'essai : La bille doit être parfaitement sphérique, son diamètre doit être fonction de la nature et de l'épaisseur du matériau contrôlé. Ainsi pour des échantillons massifs, il est possible d'utiliser une bille de diamètre

Aciers	bille 10 mm	$k = 0{,}33$
Cuivre	bille 10 mm charge 1 000 daN	$k = 0{,}50$
Duralumin	idem	$k = 0{,}40$

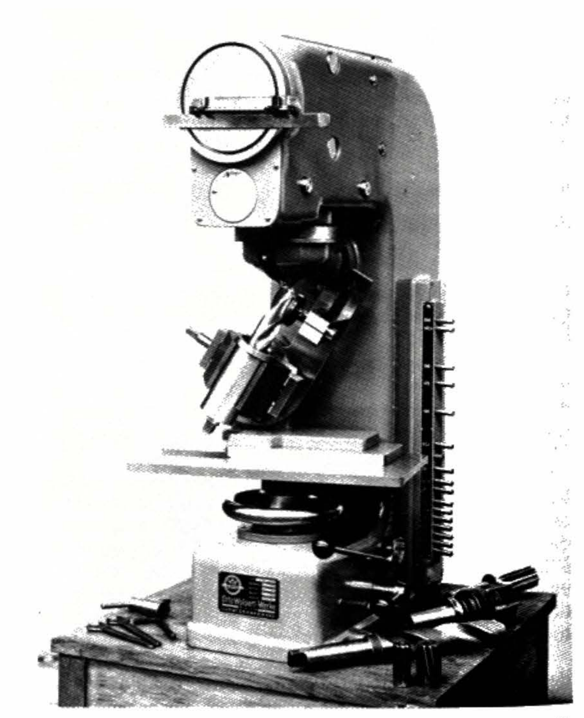


Fig. I-122 — Machine pour essais de dureté Rockwell (*Wolpert — Testwell*)

égal à 10 mm alors que pour des tôles d'acier d'épaisseur supérieure à 3 mm, le diamètre de la bille ne doit pas dépasser 5 mm. Pour des épaisseurs plus faibles ou des matériaux moins durs, il est possible d'utiliser des billes de 2,5 ou 1 mm de diamètre.

L'effort est appliqué progressivement; de plus il est fonction du diamètre de la bille utilisée afin que le diamètre de l'empreinte soit compris entre le tiers et les deux tiers de celui de la bille. Dans le cas des aciers, l'effort est lié au diamètre de la bille par la relation normalisée : $P = 30\ D^2$, où, l'effort P est donné en décanewtons, si le diamètre D de la bille est exprimé en millimètres.

La surface de l'échantillon doit être plane, lisse et propre. La distance entre le centre des deux empreintes, ou par rapport aux bords de l'échantillon, doit être supérieure à trois fois le diamètre. La durée de l'application de la charge doit être proche de cinq minutes afin que le diamètre de l'empreinte soit indépendant de celle-ci.

La mesure du diamètre de l'empreinte est effectuée selon deux axes orthogonaux au moyen d'un microscope à oculaire micrométrique. Le diamètre considéré comme caractéristique de la dureté est égal à la moyenne des deux mesures.

Meyer a apporté une amélioration à la méthode Brinell en rapportant la charge P à la projection de l'empreinte dans le plan perpendiculaire à la direction de l'effort. Ces considérations permettent de donner une autre définition de la dureté. Celle-ci appelée dureté de Meyer correspond à la valeur de la pression moyenne exercée pendant la durée de l'essai en l'absence de frottements ; elle varie avec la charge.

La relation entre la charge et le diamètre d'empreinte varie suivant une loi empirique : $P = K\,d^n$; K et n sont des constantes caractéristiques du matériau et n est compris entre 2 (état écroui) et 2,5 (état recuit). En coordonnées logarithmiques, on obtient la droite de Meyer dont la pente n permet de caractériser le degré d'écrouissage.

Cette relation n'est pas applicable aux faibles charges (il faut que $d/D > 0{,}1$).

Méthode Vickers. — L'essai Vickers consiste à appliquer sur l'échantillon à étudier une pyramide de diamant à base carrée, d'angle au sommet égal à 136°, soumise à une charge constante.

Le nombre de dureté Vickers H_v est le rapport de la charge P à la surface S de l'empreinte. La grandeur mesurée après l'essai est la diagonale d de l'empreinte. La dureté Vickers est égale à :

$$H_v = \frac{P}{\dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{d^2}{\sin \dfrac{136^\circ}{2}}} = 1{,}8544\ \frac{P}{d^2}$$

Conditions de l'essai : Les précautions à respecter sont les mêmes que dans l'essai Brinell, cependant quelle que soit la pénétration l'angle du pénétrateur est tel que l'empreinte est toujours équivalente, à celle d'une empreinte de bille optimale. Les charges, faibles, sont comprises entre 1 et 120 daN suivant les cas.

La diagonale de l'empreinte peut être mesurée, soit au moyen d'un microscope à oculaire micrométrique, soit au moyen d'une réglette graduée sur le dépoli de projection dont sont munis certains appareils d'essais.

Méthode Rockwell. — L'essai Rockwell consiste à appliquer un pénétrateur conique en diamant ou une bille d'acier, d'abord au moyen d'une précharge faible, puis sous charge environ dix fois plus grande.

Le nombre de dureté Rockwell est la différence entre une constante γ qui est fonction du pénétrateur choisi et la profondeur h exprimée en micromètres ainsi :

Dureté Rockwell C (cône de diamant) : $H_{RC} = 100 - h$;

Dureté Rockwell B (bille) : $H_{RB} = 130 - h$.

Conditions de l'essai : Les conditions de préparation des échantillons sont les mêmes que pour tous les autres essais de dureté. La précharge de 10 daN est destinée à éliminer les causes d'erreur dues à l'état de la surface de l'échantillon. La charge appliquée est comprise en général entre 50 et 150 daN.

Dans le cas de métaux de faible dureté, on utilise une bille d'acier de diamètre égal à 1,6 mm (Rockwell B) ; pour les métaux de grande dureté, on utilise une pointe conique en diamant d'angle au sommet égal à 120°, et terminée par une pointe sphérique de rayon égal à 0,2 mm.

Microdureté. — Les essais Brinell, Rockwell et Vickers correspondent à des mesures de la dureté macroscopique où de nombreux cristaux constituant le métal, ou l'alliage, participent à la mesure. Il peut être intéressant de déterminer la dureté de chacune des phases ou de chacun des constituants métallographiques de l'alliage. Dans ce cas, on peut utiliser un pénétrateur en diamant conique ou pyramidal, monté dans la lentille frontale de l'objectif d'un microscope. La charge peut être appliquée au moyen de poids ou d'un ressort taré, et peut varier de 0,01 à 1 daN. Sur un échantillon poli et attaqué, on peut donc choisir le constituant à étudier au moyen du microscope, appliquer le pénétrateur à l'endroit choisi et mesurer le diamètre de l'empreinte obtenue. Le diamètre de cette empreinte est voisin de 10 µm.

Il existe de nombreuses autres méthodes de mesure de dureté : Monotron Shore, Knoop, Scleroscopie Shore (mesure de la hauteur de rebondissement d'une petite masse métallique), méthode pendulaire.

4.4.3. Essais de résilience

1° *Définition.* — L'essai de résilience a pour but de mettre en évidence les aptitudes des matériaux à résister au choc. La mesure de la résilience s'effectue par la détermination du travail absorbé par la rupture d'une éprouvette de forme et de dimensions normalisées. La résilience s'exprime pratiquement en joule par centimètre carré.

2° *Principe.* — La méthode la plus couramment utilisée consiste à effectuer un essai de flexion par choc sur un barreau parallélépipédique entaillé en son milieu, le but de l'entaille étant de créer une augmentation locale de contrainte tout en favorisant l'apparition des contraintes triaxiales qui facilitent la rupture par décohésion.

La résilience, qui est l'inverse de la fragilité, est fonction des conditions de l'essai et en particulier de la température. (fig. I-123).

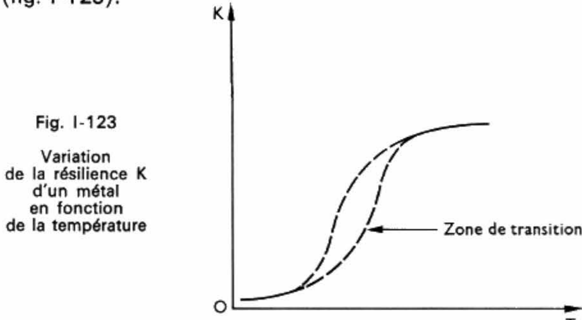


Fig. I-123
Variation de la résilience K d'un métal en fonction de la température

3° *Conditions de l'essai.* — L'appareil d'essai est un mouton-pendule constitué d'une masse tournant autour d'un axe. La masse comporte un couteau destiné à rompre l'éprouvette. L'appareil est équipé d'un système qui permet de mesurer l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette.

Le dispositif le plus communément utilisé est le mouton-pendule de Charpy (fig. I-124). Dans ce système, la masse est abandonnée à elle-même à partir d'une hauteur déterminée par construction. L'éprouvette se trouve au point bas. La masse entraîne une aiguille qui se déplace devant un cercle gradué. La mesure de l'angle de remontée, avec et sans rupture de barreau, permet le calcul du travail absorbé par cette rupture.

Soit α l'angle de départ, θ l'angle de remontée, P le poids de la masse et R le rayon de rotation du centre de gravité, π_1 le travail absorbé par les frottements mécaniques et la résistance de l'air à la descente, π_2 le travail absorbé de la même façon à la remontée, on a :

$$PR\,(1 - \cos\alpha) - \pi_1 - [PR\,(1 - \cos\theta) + \pi_2] = T + \tau\,;$$

T étant le travail absorbé par la rupture et τ le travail absorbé par la projection des fragments de l'éprouvette.

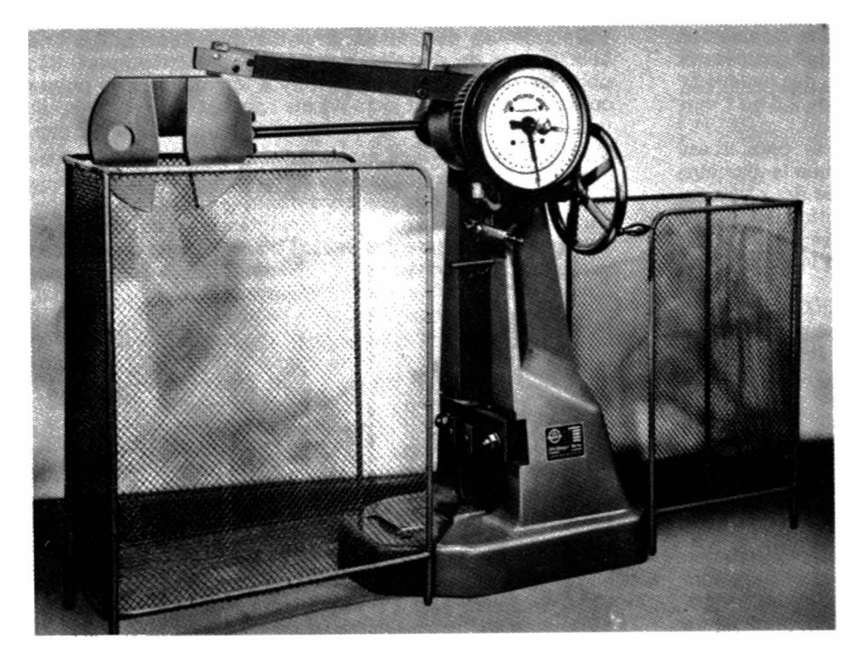


Fig. I-124 — Mouton-pendule de Charpy (*Wolpert-Testwell*)

Fig. I-125

Courbe de Wöhler

On en tire :

$$T = PR\,(\cos\theta - \cos\alpha) - \pi_2 - \pi_1 - \tau$$

Les valeurs de π_1 et π_2 peuvent être déterminées par une expérience préliminaire sans éprouvette ; en général, on néglige le travail τ.

La loi de similitude n'est pas applicable aux essais de résilience, il est donc nécessaire de spécifier le type de l'éprouvette utilisée. En France, l'éprouvette Mesnager est la plus couramment employée. Elle est constituée d'un barreau de section 10 mm × 10 mm, de longueur 55 mm, entaillé en son milieu par une saignée de 2 mm × 2 mm à fond rond de rayon 1 mm.

4.4.4. Essais d'emboutissage

1° *Définition.* — L'essai d'emboutissage est destiné à mesurer l'aptitude de tôles à la déformation dans les conditions habituelles de l'emboutissage.

2° *Principes, conditions et essais.* — La loi de similitude n'étant pas applicable, les essais ne sont comparatifs que pour des conditions identiques. Ces essais consistent à appliquer progressivement un effort mécanique sur un poinçon agissant sur un flanc de tôle pris entre deux plaques perforées qui font office de matrice et de serre-flanc. On arrête l'essai à l'apparition de la première fissure.

Le tableau suivant donne les conditions des divers essais :

	Dimensions de l'éprouvette	Diamètre de l'alésage des mors	Diamètre du poinçon	Forme poinçon	Autres caractéristiques de l'éprouvette
Essai Persoz	⌀ 90 mm	50 mm	20 mm	calotte sphérique	
Essai Erichsen	⌀ 90 mm	27 mm	20 mm	calotte sphérique	
K.W.I.		⌀ du poinçon + 2			Éprouvette percée au centre
$e < 2$ mm	⌀ 90 mm	épaisseurs de tôle	40 mm	plan	⌀ 12 mm
$e > 2$ mm			55 mm	plan	⌀ 16,5 mm

Les résultats s'expriment de la façon suivante :

Essais Persoz et Erichsen : on mesure l'effort et la flèche correspondant à l'apparition de la première fissure.

Essai K.W.I. : si d est le diamètre du trou central avant déformation, d' le diamètre après déformation, l'aptitude à l'emboutissage s'exprime par le rapport : $A = \dfrac{d' - d}{d}$.

Pour cet essai, on peut relier la charge maximale d'emboutissage P à la charge de rupture à la traction R par :

$$R = \frac{P}{\pi e\,(D + e - d)}$$

si D est le diamètre du poinçon et e l'épaisseur de la tôle.

L'examen des fissures, après l'essai, permet une approximation grossière du degré d'isotropie ou d'anisotropie de la tôle.

4.4.5. Essais de fatigue

1° *Définition.* — C'est la détermination de la susceptibilité à la rupture des matériaux soumis à une contrainte faible et répétée un très grand nombre de fois.

2° *Principe.* — Les essais précédemment décrits ne permettent d'étudier que le comportement des matériaux soumis à des contraintes statiques ; en réalité ceux-ci doivent habituellement supporter des contraintes variables suivant des lois en général indéterminées. Dans ces conditions, les formules habituelles de résistance des matériaux ne sont plus applicables sans être majorées d'un coefficient de sécurité. Les essais de fatigue permettent de définir ceux-ci. On distingue trois sortes de sollicitations :

— les sollicitations alternées : les efforts varient entre deux valeurs extrêmes de signes contraires ;

— les sollicitations répétées : les efforts varient de 0 à une valeur soit positive, soit négative ;

— les sollicitations ondulées : les efforts varient autour d'une valeur soit positive, soit négative, mais ne s'annulent pas.

On définit comme limite de fatigue, la limite qui correspond à l'effort maximal qui peut être appliqué indéfiniment sans provoquer la rupture. Généralement, cette limite est théorique. On définit une limite conventionnelle pour laquelle le nombre de sollicitations peut atteindre 10^7 à 10^8 cycles sans que la rupture se produise. On détermine expérimentalement cette limite en soumettant une série d'éprouvettes à des charges différentes, et en déterminant pour chacune d'elles le nombre de cycles ayant amené la rupture. Sur un diagramme, si l'on porte en abscisses le logarithme du nombre d'efforts unitaires pour lesquels intervient la rupture et en ordonnées les charges unitaires, on obtient une courbe (courbe de Wöhler, fig. I-125) présentant une asymptote horizontale. La limite d'endurance correspond à l'ordonnée de cette droite.

Les essais de fatigue peuvent être exécutés sur des machines à efforts axiaux, à flexions planes ou rotatives,

à torsions alternées. Les résultats sont exprimés en décanewtons par millimètre carré ; on les définit également quelquefois par $\frac{f}{R}$ (rapport d'endurance) où f est la charge appliquée pendant l'essai de fatigue et R la charge de rupture.

Deux types d'éprouvettes sont utilisés : l'éprouvette aviation conique et l'éprouvette Caquot cylindrique comportant un étranglement (éprouvette réduite).

4.4.6. Essais mécaniques divers

1° *Essais de fluage.* — L'essai de fluage a pour but de déterminer les conditions d'allongement en fonction du temps pour un matériau soumis à une charge constante et dont la température a une valeur fixée.

La résistance au fluage est définie par une charge correspondant à la vitesse de fluage considérée pour une température déterminée. Les machines utilisées pour ces essais sont soit des machines de traction modifiée, soit des machines à contrepoids, les deux types de montage comprennent un four permettant de faire varier la température de l'éprouvette.

2° *Autres essais.* — De très nombreux autres essais mécaniques sont utilisés en recherche ou dans l'industrie. À titre d'exemple, on peut encore citer : les essais de compression, les essais de pliage sur tôle ou sur fil, les essais de torsion, les essais d'usure.

4.5. Autres types d'essais physiques ou physico-chimiques. — Les expérimentateurs ont été amenés à mettre au point un grand nombre d'autres essais basés sur les différentes propriétés de métaux. Sans entrer dans la description détaillée de chacun d'eux, on les rappellera succinctement :

— la mesure de la conductibilité électrique qui permet de détecter la contamination de métaux très purs par des impuretés ou d'étudier les phénomènes d'écrouissage et de recristallisation ;

— la détermination du point de Curie par mesure du magnétisme ;

— la conductibilité thermique ;

— le contrôle ultrasonore destiné à détecter les défauts dans les pièces par réflexion des ondes ultrasonores sur ceux-ci.

CHAPITRE II

ÉLABORATION ET UTILISATION DES MÉTAUX ET ALLIAGES

1. MÉTHODES GÉNÉRALES D'ÉLABORATION DES MÉTAUX

1.1. Minerais. — En général les métaux ne se trouvent pas dans la nature sous la forme métallique mais sous forme de combinaisons chimiques mélangées à des roches appelées *gangue* ; l'ensemble constitue ce que l'on désigne sous le nom de minerai. La valeur d'un minerai est conditionnée par sa richesse en métal utile, par sa facilité d'extraction, par sa situation géographique. Cette évaluation est, bien entendu, fonction de la valeur marchande du métal considéré.

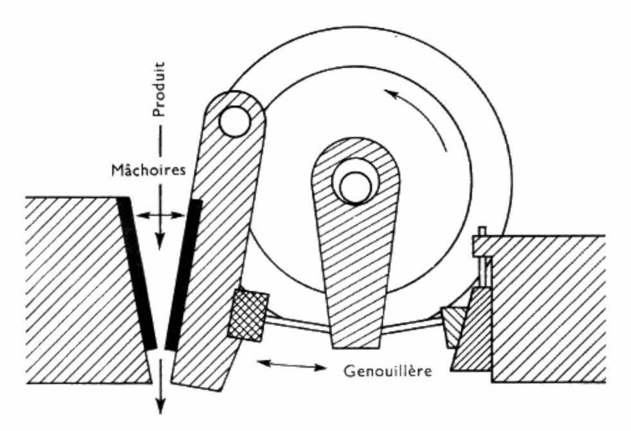
1.1.1. Classification des minerais. — En fonction de leur composition chimique on peut classer les minerais en six catégories : les *métaux natifs* (Au, Ag, Cu, Fe, Bi) ; les *oxydes* (Cu, Sn, Fe, Al, Co) ; les *carbonates* (Cu, Pb, Zn, Fe, Mg) ; les *sulfures* (Cu, Pb, Zn, Ni, Hg, Ag, Co) ; les *silicates* (Ni, Zn) ; les *chlorures* (Ag, Mg, Ca, Na). La séparation de la gangue et des composés et l'extraction des métaux à partir de ceux-ci nécessite une série d'opérations dont la nature dépend du minerai considéré. Ces opérations comprennent : le traitement des minerais, l'obtention éventuelle de produits sous une forme chimique plus facile à traiter, l'élaboration du métal et son affinage.

On distingue deux modes généraux de traitement : la *voie sèche* (grillage et calcination, fusion ébullition, volatilisation, électrolyse, ignée) et la *voie humide* (dissolution, précipitation, filtration, amalgamation, électrolyse de la solution).

1.1.2. Préparation des minerais. — En général, le minerai tel qu'il sort de la mine n'est pas exploitable : il doit subir une série de préparations destinées à en normaliser les dimensions tout en les amenant à des valeurs compatibles avec le traitement chimique ultérieur. Ce traitement est fréquemment complété par une opération d'enrichissement qui a pour but d'éliminer la plus grande partie des stériles de telle sorte que l'augmentation de concentration permette de meilleures conditions de réaction.

1° *Traitements mécaniques.* — Les traitements mécaniques comprennent :

a) Le *concassage* qui permet d'obtenir, à partir des blocs de minerai, des morceaux de 5 à 10 cm. Le concassage est réalisé au moyen de concasseurs dont on distingue deux types : le *concasseur à mâchoires* provoquant la fragmentation par pression du minerai entre deux mâchoires (fig. II-1), le *concasseur giratoire* où le minerai est brisé par pression entre une cuve tronconique et un rouleau mobile conique (fig. II-2).



Fif. II-1 — Concasseur à mâchoires

b) Le *broyage* qui réduit les produits concassés en poudre fine. Les types de broyeurs sont assez nombreux ; leur utilisation dépend de la nature du minerai et du

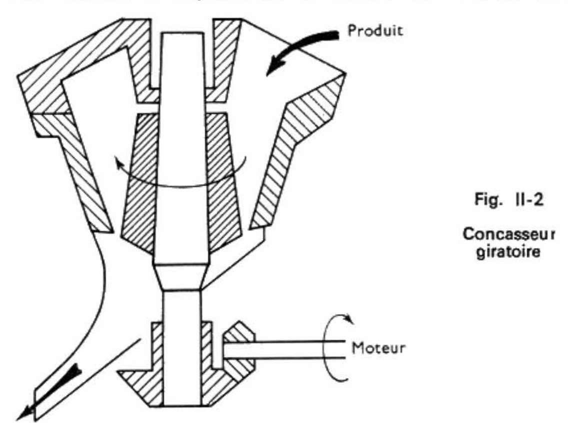


Fig. II-2

Concasseur giratoire

résultat recherché. Le *broyeur à cylindres* est constitué de deux cylindres de même diamètre tournant en sens contraire, les morceaux de minerai, entraînés par gravité, sont écrasés lors de leur passage entre les cylindres. Le *broyeur à boulets* réduit en poudre le minerai concassé par écrasement au moyen de boulets d'acier en mouvement libre dans un tambour rotatif (fig. II-3). Dans le *broyeur centrifuge*, les morceaux de minerai sont pulvérisés par centrifugation dans une gorge annulaire où des pièces frottantes, également appliquées par inertie centrifuge, viennent écraser les produits (fig. II-4). Dans le *broyeur à meules*, le minerai est écrasé entre une meule et une sole comme dans un moulin (fig. II-5). Le *broyeur à chocs* est équipé de marteaux mobiles, entraînés par un moteur; ces marteaux frappent le minerai pour le broyer.

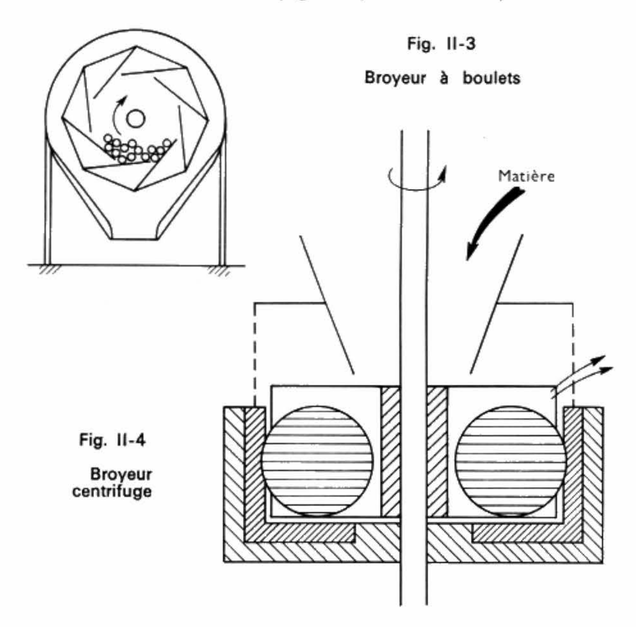


Fig. II-3
Broyeur à boulets

Fig. II-4
Broyeur centrifuge

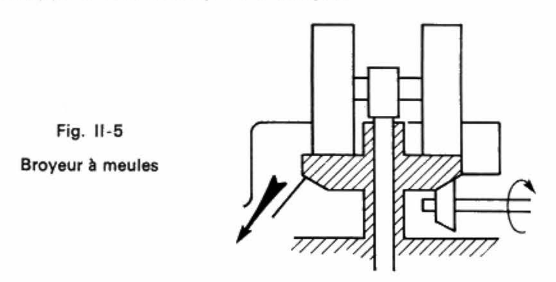


Fig. II-5
Broyeur à meules

c) Le *criblage* ou *tamisage* qui permet de trier les produits obtenus en fonction de leur granulométrie et de recycler toute fraction jugée insuffisamment broyée. Cette opération peut être réalisée au moyen d'un *trommel* qui est un tambour tournant dont la surface inclinée est garnie de treillis métalliques de mailles croissantes de l'entrée vers l'autre extrémité (fig. II-6). On utilise également des grilles à rouleaux et des tamis vibrants.

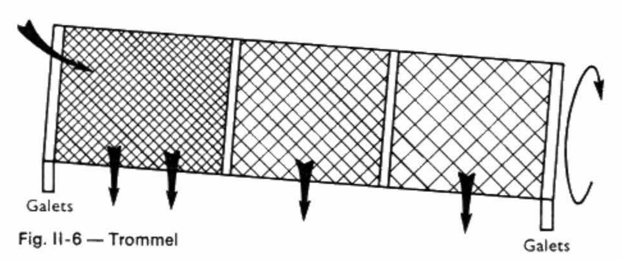


Fig. II-6 — Trommel

2° *Séparation et enrichissement*. — Ces opérations permettent de séparer, après broyage, le composé chimique utile et la gangue ou de séparer deux éléments utiles, de nature chimique différente, afin d'obtenir des produits d'une richesse suffisante pour des traitements ultérieurs. Les principales méthodes de séparation sont les suivantes :

a) Le *triage hydromécanique*. Ce mode de séparation est basé sur le fait que, dans l'eau, la vitesse de décantation des produits est fonction de la dimension des grains, de leur densité et de leur nature chimique. Si l'eau circule sur un crible muni de trous dont les diamètres croissent progressivement et sont convenablement calculés, il est possible d'effectuer le tri des minerais en fonction de leur diamètre et de leur densité, c'est-à-dire en fonction de leur nature chimique. Pour ce faire, on utilise :

— l'*hydrotrieur à piston* (fig. II-7) qui est formé de plusieurs compartiments placés en série, divisés par une cloison médiane et qui comportent un tamis sur lequel circule le minerai. Un piston placé dans le premier compartiment provoque un mouvement alternatif de l'eau ; grâce au flux les parties les plus légères passent vers le tamis suivant ; le reflux entraîne les parties les plus lourdes dans un décantoir.

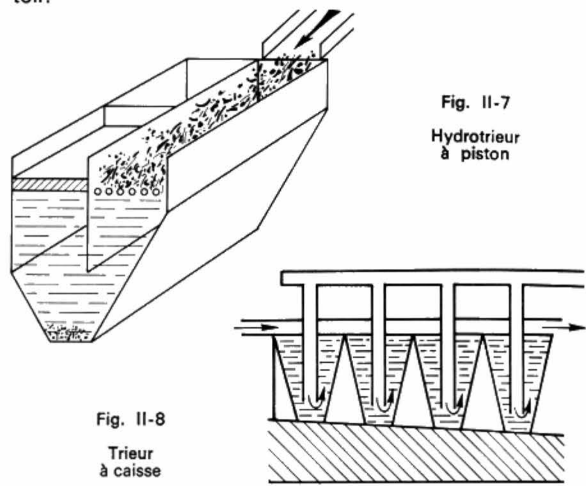


Fig. II-7
Hydrotrieur à piston

Fig. II-8
Trieur à caisse

— le *trieur à caisse* (fig. II-8) qui est constitué de compartiments pyramidaux de dimensions croissantes pour provoquer un ralentissement du courant horizontal ; ces appareils sont en général équipés d'un injecteur d'eau placé en bas de chaque caisse ;

— la *table à secousses* (fig. II-9) : des réglettes de longueurs croissantes sont fixées sur une table inclinée qui est animée d'un mouvement vertical rapide et d'un mouvement horizontal.

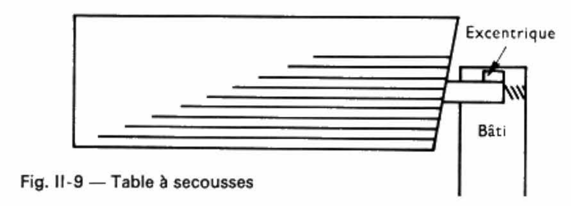


Fig. II-9 — Table à secousses

b) Le *flottage* ou *flottation*. L'emploi d'un bain composé d'eau et d'un réactif convenable permet de séparer la partie riche du minerai, qui reste à la surface et la gangue, qui tombe au fond. La séparation est provoquée par injection de bulles d'air très fines dans une boue formée du minerai pulvérisé, d'eau et du réactif. Le réactif enrobe le minerai d'un film très mince et l'empêche d'être mouillé par l'eau ; il favorise la division de l'air et l'accrochage des bulles sur le minerai non mouillé. Il provoque ainsi la formation d'une écume contenant la partie utile du minerai. Dans le cas de minerais complexes, par l'addition d'un agent modifiant, il est possible de favoriser (activant), ou de contrarier (déprimant), la flottation de telle ou telle fraction. Cette flottation différentielle permet de séparer les différents constituants d'un minerai complexe. Le réactif est souvent constitué d'une huile, d'un xanthate alcalin, d'un acide ou d'une base. Les agents modifiants sont très nombreux : acide sulfurique, sulfure de sodium, silicate

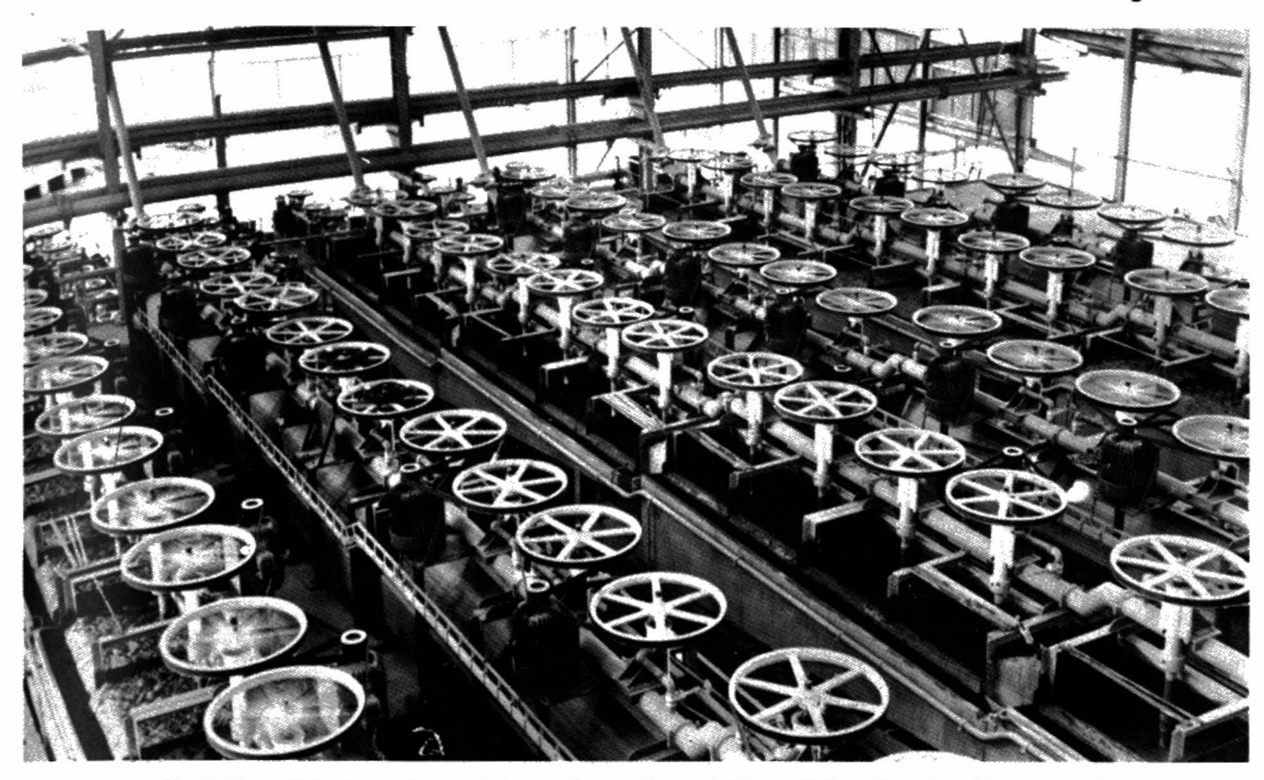


Fig. II-10 a — Salle des machines de flottage au Congo (Kinshasa) (*Centre d'information cuivre, laitons, alliages*)

de sodium, carbonate de sodium, soude, chaux, cyanure de..., sulfate de cuivre, etc.

Le minerai est broyé plus finement que dans le cas des autres méthodes de séparation puis introduit dans une série de bacs divisés en deux parties séparées par une grille. La pulpe et l'air sont introduits à la partie inférieure ; un agitateur assure le brassage (fig. II-10 a et 10 b). Des

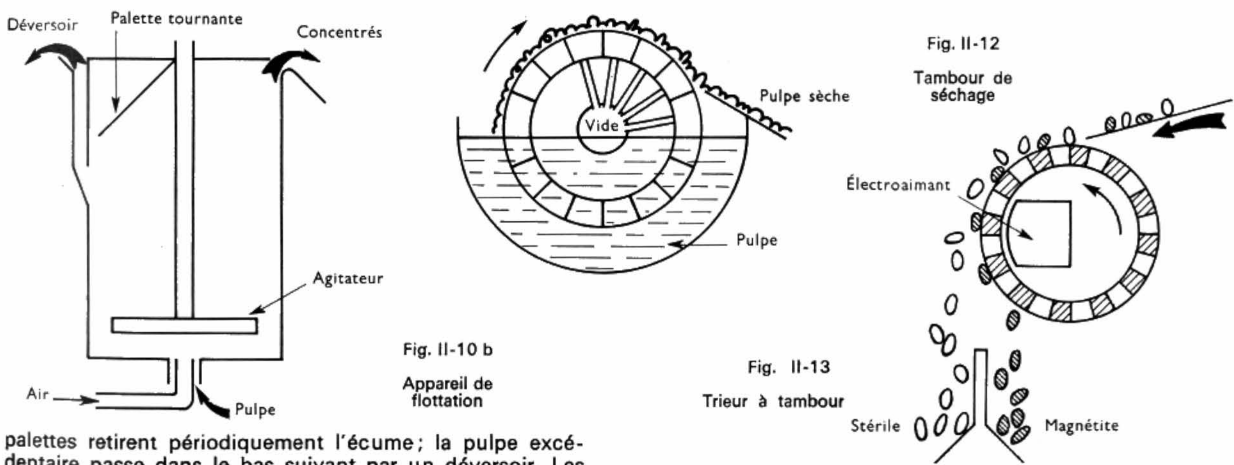


Fig. II-10 b
Appareil de flottation

Fig. II-12
Tambour de séchage

Fig. II-13
Trieur à tambour

palettes retirent périodiquement l'écume ; la pulpe excédentaire passe dans le bas suivant par un déversoir. Les écumes sont concentrées dans des épaississeurs (fig. II-11) et séchées dans des appareils continus à tambour filtrant (fig. II-12).

c) Le *triage magnétique*. Ce procédé est utilisé pour la séparation des principaux corps ferromagnétiques : fer et oxyde de fer (Fe_3O_4), cobalt, nickel, sulfure de fer (SFe). Le minerai se déplaçant dans un champ magnétique, les éléments ferro- ou paramagnétiques sont séparés par attraction. Les figures II-13 à 15 montrent quelques exemples de trieurs magnétiques.

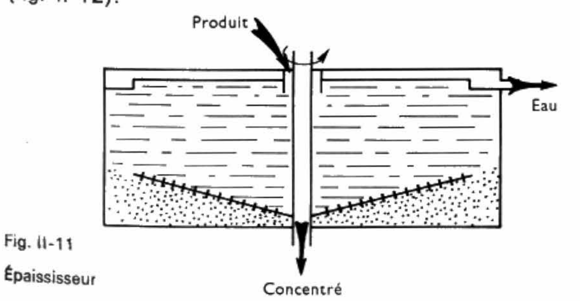


Fig. II-11
Épaississeur

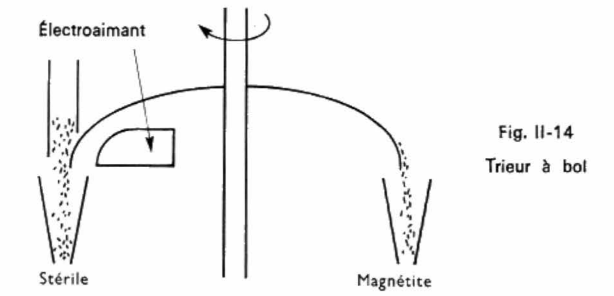


Fig. II-14
Trieur à bol

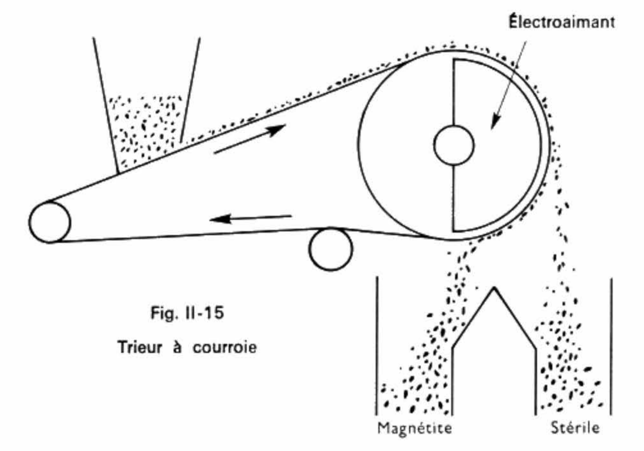


Fig. II-15
Trieur à courroie

1.1.3. Traitement des minerais et élaboration. — Le traitement des minerais est variable selon la forme chimique du composé enrichi. La figure II-16 donne le schéma général simplifié de traitement des différents minerais. Excepté pour les métaux natifs, toutes les opérations tendent en général, soit à la formation d'oxydes qui sont ensuite réduits par différents procédés, soit à la formation de mélanges de composés donnant le métal brut par autoréaction. Les métaux impurs obtenus sont ensuite affinés.

1° *Traitements préliminaires.*

a) *Minerais sulfurés.* — On utilise trois procédés :

— pour les minerais purs : grillage à mort afin que le sulfure métallique (SM) soit entièrement transformé en oxyde métallique (OM) :

$$2\,SM + 3\,O_2 \rightarrow 2\,OM + 2\,SO_2 \nearrow$$

Exemples : sulfure de plomb, sulfure de zinc.

— pour les minerais riches et impurs qui, généralement, contiennent une forte proportion de sulfure de fer, on procède à un grillage ménagé de telle sorte que l'on ait :

$$4\,(MS_x,\,n\,FeS_2) + 7\,n\,O_2 \rightarrow 2\,(2\,MS_x,\,n\,FeS) + 2\,n\,FeO + 3n\,SO_2$$

Le minerai grillé est transformé ensuite par fusion en une matte :

$$2MS_x,\,n\,FeS + n\,FeO + n\,SiO_2 \rightarrow \underbrace{2MS_x,\,n\,FeS}_{\text{matte}} + \underbrace{n\,(FeO,\,SiO_2)}_{\text{scorie}}$$

La matte, partiellement déferrée, est ensuite grillée en présence de silice pour oxyder et scorifier le fer restant :

$$2\,(2\,MS_x,\,n\,FeS) + 2\,n\,SiO_2 + 3\,n\,O_2 \rightarrow \underbrace{4\,MS_x}_{\text{sulfure pur}} + \underbrace{2\,n\,(FeO,\,SiO_2)}_{\text{scorie}} + 2\,n\,SO_2 \nearrow;$$

On est alors ramené au traitement d'un sulfure pur :

Exemples : minerai de nickel, minerai de cuivre.

— pour les minerais pauvres et impurs : grillage modéré les transformant en sulfates :

$$MS_x,\,n\,FeS_2 + (3n + 2x)O_2 \rightarrow M\,(SO_4)_x,\,n\,FeSO_4 + n\,SO_2$$

Ensuite, les sulfates sont lessivés à l'aide d'une solution d'acide sulfurique et d'extraits.

b) *Minerais silicatés.* — Dans certains cas, le minerai est traité par la chaux pour donner un oxyde :

$$SiO_2,\,OM + \underbrace{O\,Ca}_{\text{chaux}} \rightarrow \underbrace{SiO_3\,Ca}_{\text{scorie}} + \underbrace{OM}_{\text{oxyde du métal M}}$$

Exemples : minerai de zinc, minerai de nickel.

Le silicate peut également être transformé en sulfure par fusion sulfurante :

$$SiO_2,\,OM + SO_4\,Ca \rightarrow SiO_3\,Ca + 2\,O_2 + SM$$

Le sulfure obtenu est ensuite traité comme tel par la première ou la deuxième méthode selon sa pureté. Exemple : minerai de nickel.

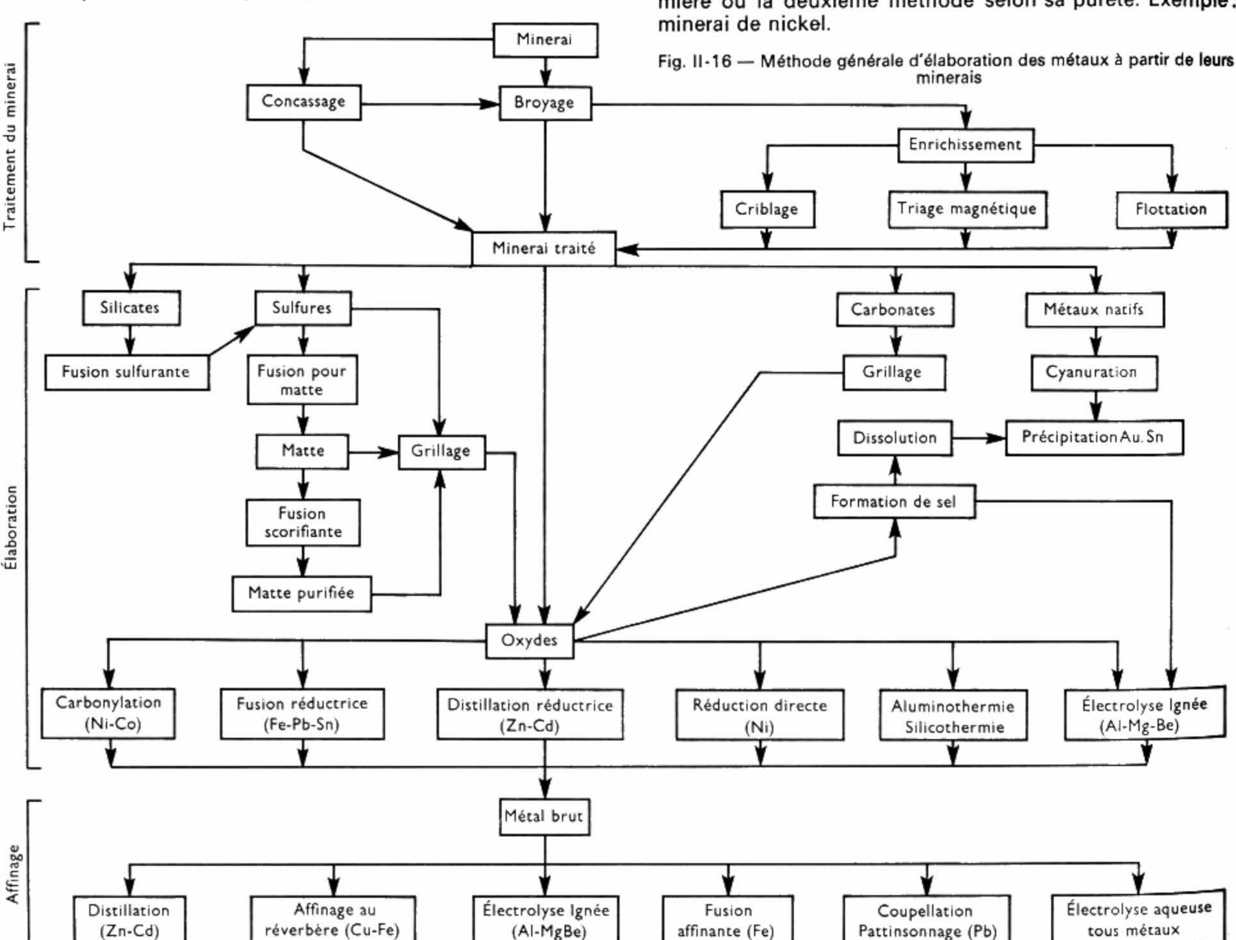


Fig. II-16 — Méthode générale d'élaboration des métaux à partir de leurs minerais

c) *Minerais carbonatés.* — En général les carbonates sont décomposés par calcination pour former un oxyde :

$$CO_3M \rightarrow OM + CO_2 \nearrow$$

Cette opération a pour but d'augmenter la teneur en métal, d'obtenir un composé poreux facilitant le traitement ultérieur et d'épurer partiellement le minerai (départ du soufre éventuel sous forme de SO_2). Cette opération, pouvant être effectuée avec un combustible quelconque permet d'économiser un combustible coûteux. Exemples : minerai de fer, minerai de zinc.

2° *Élaboration du métal brut.* — Les traitements préliminaires ont ramené le métal à un oxyde ou à un sulfure riche et pur. À partir de ces composés, différents procédés d'élaboration peuvent être utilisés :

— *Sulfure riche et pur.* — Le métal brut M peut être obtenu par grillage partiel et réaction :

$$3SM + 3O_2 \rightarrow SM + 2MO + 2SO_2 \nearrow \rightarrow 3M + 3SO_2 \nearrow.$$

Exemple : Obtention du cuivre.

— *Oxydes.* — Les méthodes de traitement sont plus nombreuses mais il est possible de les grouper en quatre familles d'inégale importance industrielle : la réduction, l'électrolyse, ignée, l'électrolyse en phase aqueuse, la carbonylation.

a) *La réduction.* — Le métal est obtenu par une réaction exothermique : $MO + R \rightarrow M + OR$. Selon les cas, le réducteur R est le carbone (c'est l'élément le plus utilisé), le silicium ou l'aluminium (pour les oxydes très stables), l'hydrogène. Selon l'état dans lequel le métal est obtenu, on distingue :

— La réduction à l'état solide, à partir d'oxydes très purs, par action d'un gaz réducteur (CO, H_2) ; l'oxyde doit être pur, car il ne peut se séparer d'une gangue éventuelle, et poreux afin d'assurer un bon contact avec l'agent réducteur. Exemple : obtention du nickel.

— La fusion réductrice, lorsque la température de traitement est supérieure à la température de fusion du métal. Le métal et la gangue, liquides tous les deux, se séparent par différence de densité ; cependant, l'accélération des échanges dans un milieu fondu provoque fréquemment la contamination du bain métallique par des impuretés qui proviennent du laitier. Exemple : obtention de fer, de plomb, d'étain.

— La volatilisation (ou sublimation) réductrice : (la température de volatilisation du métal est égale à la température de traitement) le métal se sépare aisément de la gangue, et donne par condensation un produit très pur. Exemple : obtention du zinc.

b) *L'électrolyse ignée.* — Les sels fondus sont dissociés en ions et lorsqu'on fait passer un courant électrique, les cations (métal) vont à la cathode où ils se déposent et les anions vont à l'anode. Les oxydes sont dissous dans des sels (halogènes) et l'électrolyse s'effectue au moyen d'une anode insoluble. Le métal est déplacé du sel et se dépose sur la cathode (il est en général fondu) ; l'halogène, libéré à l'anode, attaque l'oxyde et régénère le milieu avec émission d'oxygène. Tout se passe donc comme s'il y avait électrolyse de l'oxyde. Exemple : obtention de l'aluminium.

c) *La carbonylation.* — Sous certaines conditions de température et de pression, les métaux de transition ont la propriété de former avec l'oxyde de carbone des composés appelés carbonyles de formule générale $M_x(CO)_y$. Ils sont volatiles mais se décomposent lorsque la pression ou la température varie. Cette propriété permet de les extraire de leurs oxydes et de les obtenir sous une forme très pure, le carbone excepté. Exemple : obtention de nickel, de cobalt.

— *Les sels divers :* Dans certains cas, on obtient un sel à partir du minerai ; celui-ci peut alors être traité, soit par électrolyse ignée (Mg, Be, Ca, Na), soit par électrolyse aqueuse (Cu, Zn, Ni).

3° *Affinage.* — Ces différents procédés d'élaboration ne permettent pas d'obtenir un métal véritablement pur. La teneur en impuretés peut varier de 1 à 10 % ; celles-ci peuvent modifier considérablement les propriétés physiques, chimiques ou mécaniques des produits obtenus. L'affinage a pour but d'enlever du métal brut, les impuretés qui nuisent à son utilisation industrielle ; elles sont mises sous une forme facilement séparable, ou moins nuisible. On distingue différentes méthodes d'affinage :

a) *L'affinage thermique sans réaction* qui permet d'éliminer, par voie purement mécanique, des impuretés insolubles à la température de l'affinage. L'affinage peut être obtenu par décantation ; dans ce cas, les particules en suspension se séparent selon la loi de Stokes et remontent à la surface (exemple : élimination de l'alumine dans les bains d'aluminium fondu, décantation des silicates dans l'acier fondu). Il est également possible d'utiliser le lavage par flux : le flux est un mélange de sels fondus que l'on met en contact des impuretés du bain par brassage énergique ; ce flux forme avec celles-ci des masses de grand volume qui décantent facilement (exemple : purification du magnésium par des flux composés de fluorures alcalins). Il est possible d'accélérer le processus par vibration ou par barbotage d'un gaz inerte.

b) *La purification par changement d'état* qui consiste à utiliser la différence des températures de fusion, ou de solidification, ou d'ébullition (sublimation) entre le métal et l'impureté, sous forme élémentaire ou composée, pour séparer les deux constituants. Si l'impureté fond à une température supérieure à celle du métal, il est possible d'utiliser le procédé de liquation (exemple : purification du plomb contenant du cuivre, ou de l'étain contenant du fer). Si le métal et l'impureté ne sont pas miscibles à l'état liquide, on utilise la ségrégation (exemple : purification du zinc contenant du plomb). Si l'impureté est plus fusible que le métal, on utilise le ressuage (exemple : purification du zinc contenant du plomb) ; dans ce cas, il est également possible d'utiliser la cristallisation fractionnée, l'impureté se concentrant dans le liquide résiduel (exemple : le pattinsonage des plombs argentifères). On peut également utiliser la sublimation et la distillation lorsque le métal considéré est plus volatil que l'impureté (exemple : purification de Mg, Ca, Zn, etc.).

c) *L'affinage thermique par réaction sélective* où l'on engage les impuretés dans une ou plusieurs réactions chimiques dont les produits se séparent aisément du métal. Il est possible de réaliser une oxydation sélective en employant l'oxygène de l'air, des oxydes métalliques, de la vapeur d'eau ou des sels oxydants ; il y a formation d'oxydes gazeux (CO, CO_2, SO_2, etc.), liquides (SiO_2, MnO, FeO, Fe_2O_3, PbO, etc.) ou solides (Al_2O_3) qui s'éliminent facilement. D'autres opérations sont également possibles : chloruration sélective (exemple : dézincification du plomb) ; sulfuration sélective (déferrisation de l'or). Une solution très utilisée consiste à employer un laitier qui réagit sur les impuretés d'un métal et les absorbe ; cette méthode, combinée à l'oxydation sélective, est à la base de la purification des alliages ferreux. L'oxydation sélective permet d'éliminer l'excès de carbone des fontes par soufflage d'air ou d'oxygène (procédés Bessemer, Thomas, à l'oxygène) ; le laitier, permet d'éliminer le phosphore s'il est basique, l'oxyde de fer (FeO) et l'oxyde de manganèse s'il est acide.

d) *L'affinage électrolytique* est une application de l'électrolyse à anode soluble. L'anode est constituée du métal à purifier ; l'électrolyte est une solution d'un sel de ce métal. Durant l'électrolyse, le métal pur se dépose à la cathode tandis que l'anode se dissout peu à peu. Les impuretés se dissolvent dans l'électrolyte, ou vont se déposer au fond des cuves. Ce procédé est utilisé pour tous les métaux que l'on désire obtenir sous une forme très pure car, même si l'impureté est passée sous une forme soluble dans l'électrolyte, l'utilisation d'un potentiel d'électrolyse convenable permet de la séparer.

e) *L'affinage à l'état solide* permet d'éliminer certaines impuretés au moyen d'un agent affinant gazeux, soit que celles-ci entrent en réaction (exemple : désoxydation du cuivre par un gaz réducteur comme l'hydrogène), soit que le métal passe sous forme gazeuse, l'impureté n'étant pas attaquée (carbonylation de certains métaux de transition : Fe, Co, Ni).

2. MÉTHODES GÉNÉRALES DE MISE EN ŒUVRE DES MÉTAUX

2.1. La coulée. — Une fois purifié, le métal fondu est coulé afin d'obtenir un produit pouvant subir les traitements ultérieurs. En général, les coulées se font en deux temps : d'abord dans une poche où le métal peut encore subir des traitements d'affinage éventuels, puis dans une lingotière afin d'obtenir un bloc de métal utilisable pour les traitements ultérieurs. Il est de plus en plus fréquent que les coulées s'effectuent sous un vide de 1 à 0,5 mm de mercure afin d'éliminer les gaz dissous, l'opération étant quelquefois complétée par barbotage d'un gaz neutre (azote, argon).

2.1.1. La coulée en lingotière. — La lingotière est un moule de fonte de section circulaire, carrée ou rectangulaire, de forme tronconique ou pyramidale. Le métal se solidifiant à partir des parois, de ce fait les impuretés qui abaissent le point de fusion ségrègent vers le centre et montent vers la partie supérieure pour finalement se localiser à proximité de la retassure (dépression provoquée par la différence de volume entre le métal liquide et le métal solide). La coulée en lingotière peut s'effectuer à l'air ou sous vide ; cependant, dans les deux cas, on observe des phénomènes de ségrégation importants et le lingot obtenu n'est jamais parfaitement homogène.

2.1.2. La coulée continue. — Pour éviter l'hétérogénéité du métal, bien que son prix en soit généralement affecté, on préfère de plus en plus utiliser la coulée continue qui rejette les impuretés vers la poche de coulée. En outre, cette méthode permet d'éviter le passage dans les laminoirs ébaucheurs.

Le principe est le suivant : le métal est coulé dans une lingotière droite en cuivre, énergiquement refroidie, d'où il est extrait à la partie inférieure au fur et à mesure qu'une peau, suffisamment résistante, s'est formée. Il sort de cette lingotière un produit constitué par un noyau encore liquide, enfermé dans une enveloppe solide. La solidification se termine en dehors de la lingotière, généralement en arrosant le lingot à l'aide d'un jet d'eau. L'extraction du lingot est faite mécaniquement, par l'action de rouleaux qui saisissent le demi-produit dès qu'il est complètement solidifié. Ces rouleaux exercent un effort important qui peut entraîner une rupture de la peau du lingot dans la zone de refroidissement surtout si la vitesse de sortie est grande et, par suite, le temps de refroidissement faible. Aussi, dès qu'il s'agit de productions importantes, exigeant un grand débit, prend-on certaines dispositions pour éviter la formation de criques qui rendraient le produit impropre à tout usage. L'une d'elles consiste à animer la lingotière d'un mouvement vertical alternatif. Dans une première phase, la lingotière descend à la même vitesse que la barre extraite. Puis son mouvement est accéléré (vitesse multipliée par 3) et elle est alors dépouillée de la longueur de peau, formée pendant la première partie de sa course descendante. Ensuite, la lingotière remonte rapidement et le cycle recommence. Le demi-produit, ainsi formé, est coupé au chalumeau à longueur convenable et dirigé vers les ateliers finisseurs.

2.2. Le laminage

2.2.1. Principe général du laminage. — La part des lingots, destinée à être utilisée sous forme de produits ne subissant plus que des transformations mécaniques, est mise en forme de demi-produit par laminage. Dans cette opération, le métal est écrasé entre deux cylindres que l'on rapproche plus ou moins selon l'épaisseur du produit à obtenir. Un laminoir se compose donc essentiellement de deux cylindres superposés en acier, tournant en sens inverse. À leurs deux extrémités ils sont munis de tourillons tournant dans des coussinets supportés par un bâti en acier. Les deux cylindres peuvent être entraînés indépendamment l'un de l'autre, chacun étant accouplé à un moteur électrique, par exemple, au moyen d'un accouplement à cardans, appelé *allonge*. Ils peuvent aussi être reliés par un train d'engrenages. Parfois un seul d'entre eux est entraîné, la rotation de l'autre étant assurée par le produit lui-même. L'ensemble du bâti, des cylindres et de leurs organes de réglage, constitue une *cage*. Les cylindres peuvent être lisses ou cannelés. Les premiers donnent des produits plats, et les autres des profils identiques à celui de la cannelure. Le laminage d'un produit nécessite plusieurs passes entre lesquelles on rapproche les cylindres.

2.2.2. Appareillage

1° *Classement des trains de laminoirs.* — On classe les trains de laminoirs en trains dégrossisseurs ou ébaucheurs, et en trains finisseurs.

Les *trains dégrossisseurs*, appelés *bloomings*, préparent des ébauches qu'on appelle *blooms, billettes, brames* ou *largets* ou *bidons*, et qui sont destinées à alimenter les trains finisseurs. Le blooming est formé généralement d'une cage équipée en duo réversible ; c'est en train de grande puissance (fig. II-17).

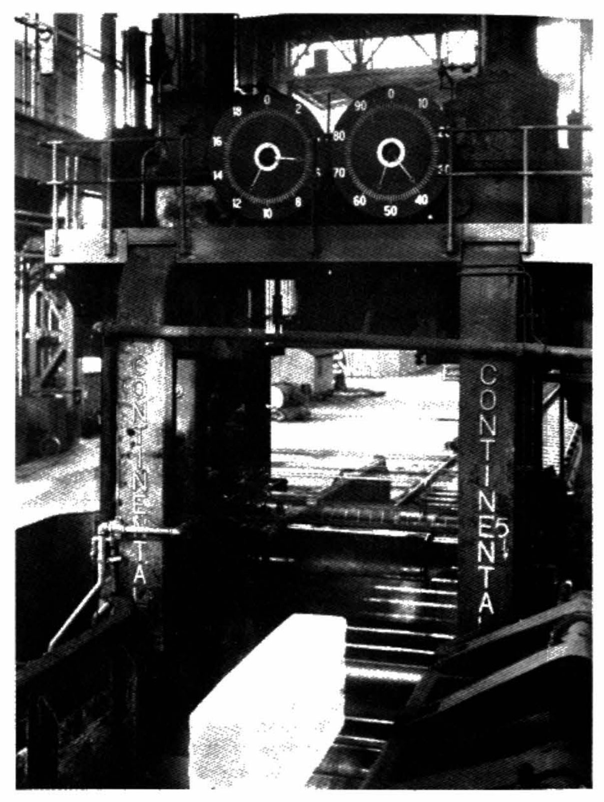


Fig. II-17 — Train de laminoir duo réversible (*S.O.L.L.A.C.*)

Les *trains finisseurs* permettent d'obtenir des produits livrables aux utilisateurs. Ils sont formés par des laminoirs à cannelures fournissant les profilés, ou par des trains à tôles. La fabrication des tôles se fait par laminage à chaud ou par laminage à froid ; ce dernier procédé permet l'obtention de feuillards de très faibles épaisseurs qui ne peuvent être obtenus par laminage à chaud. Les laminoirs à tôles épaisses peuvent être de simples duos, composés de deux cylindres lisses. Cependant, quelle que soit la rigidité de ces cylindres, ils se déforment en cours de travail et la tôle manque de régularité (son épaisseur étant plus forte au centre que sur les bords). Aussi emploie-t-on généralement des cages quarto dans lesquelles les cylindres de travail, réversibles comme dans un blooming, reposent sur des cylindres d'appui de très gros diamètre, qui empêchent leur flexion (fig. II-18). Pour le laminage à froid de feuillards très minces et d'épaisseur très régulière, on utilise des laminoirs comprenant un très grand nombre de cylindres d'appui : laminoirs Sendzimir.

2° *Types de laminoirs.* — Dans un *laminoir sens simple*, du fait du mode d'entraînement, le passage ne peut se faire que dans un sens, toujours le même, et à chaque passe il faut ramener l'ébauche en cours de transformation du côté correspondant au sens d'entraînement du laminoir. Cela constitue une perte de temps importante. Les *laminoirs réversibles* fonctionnent alternativement dans un sens et

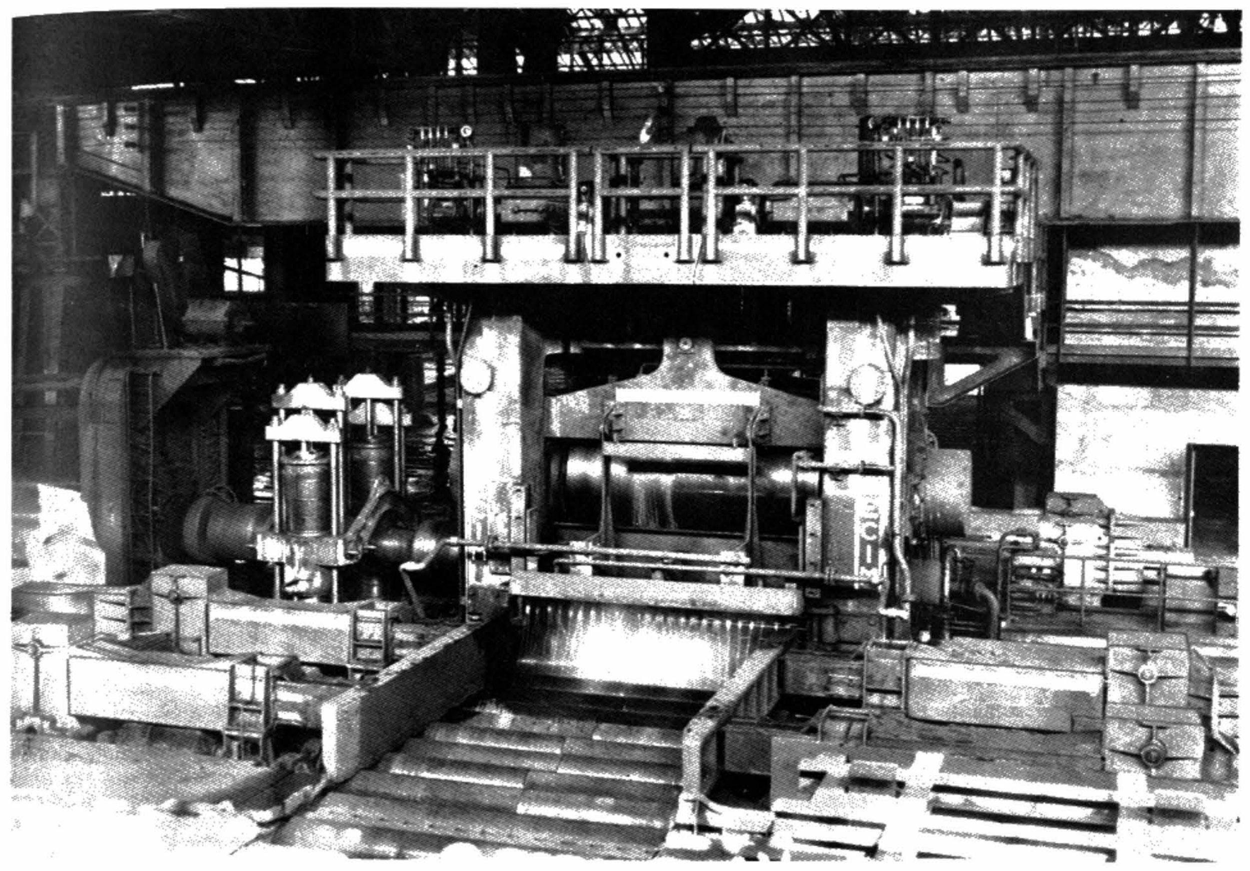


Fig. II-18 — Train quarto pour tôles fortes (*Société des forges et ateliers du Creusot*)

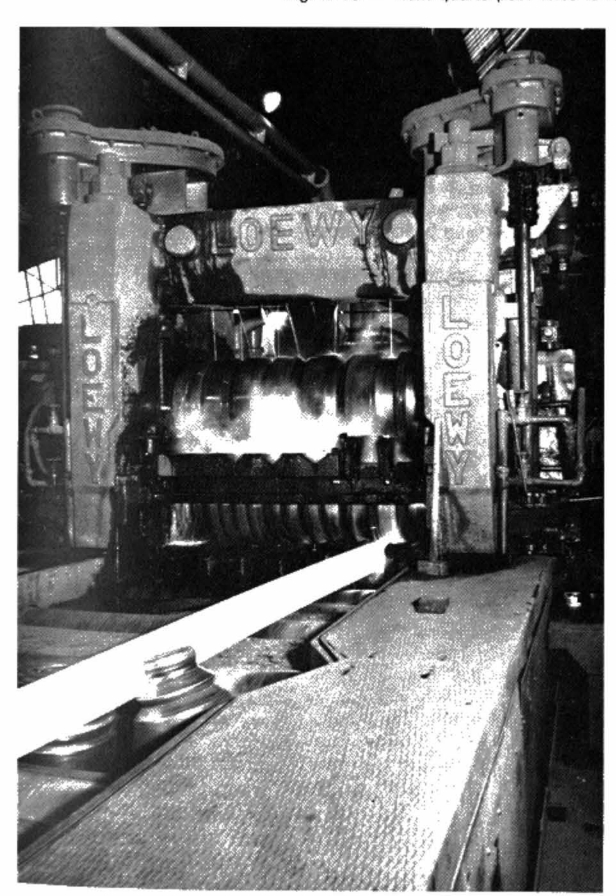


Fig. II-19 — Train trio (*Société des forges et ateliers du Creusot*)

dans l'autre (laminage à l'aller et au retour). À cet effet, le laminoir est muni d'un dispositif d'inversion. C'est le cas des bloomings utilisés pour les dégrossissages des lingots. On peut aussi utiliser une cage comportant trois ou quatre cylindres superposés :

— *Laminoirs trio formés de trois cylindres superposés* (fig. II-19). Ce dispositif présente un inconvénient : usure plus grande du cylindre central utilisé deux fois plus que les deux autres ; cela complique le réglage. Un système élévateur (bras articulés pour les produits lourds, ou tablier releveur pour les produits légers), permet de porter l'ébauche au niveau d'entraînement du cylindre supérieur et du cylindre central.

— *Laminoir double duo.* Il comprend quatre cylindres travaillant deux à deux, et ne présentant pas, par conséquent, l'inconvénient précédent : le train comprend également un système élévateur (l'ensemble de plusieurs cages de laminoirs constitue un train).

2.2.3. Mise en œuvre. — Les laminoirs servent à mettre en forme les demi-produits utilisés dans les industries de transformation. On distingue les produits plats (tôles fortes, minces ou fines et feuillards) et les produits profilés (profils divers et fils-machine). Les exemples qui vont suivre sont relatifs aux transformations des alliages ferreux ; à certaines variantes près les mêmes principes sont utilisés pour les autres métaux et alliages.

1° *Fabrication de produits plats.* — La fabrication comporte trois phases principales :

— Une série d'opérations de dégrossissage, effectuées au moyen d'un puissant blooming (souvent appelé *slabbing*) qui permet de transformer le lingot (dont la masse peut atteindre 25 tonnes) en un produit de 100 à 200 mm d'épaisseur et 1,50 m de largeur, appelé *brame*.

— La transformation des brames en une bande de tôle, dont l'épaisseur peut être réduite à 1,2 mm, par passage dans les cages d'un train continu à chaud.

— Le laminage à froid qui permet de réduire l'épaisseur de la tôle jusqu'à 0,2 mm d'épaisseur environ.



Fig. II-20 — Train à chaud: cages dégrossisseuses (*S.O.L.L.A.C.*)

La description qui suit est celle des installations de la Société Lorraine de Laminage Continu. Les lingots, après démoulage et réchauffage dans des fours pits d'une capacité totale d'environ 3 000 t, sont transformés en brames par un puissant blooming. Une cisaille à brames permet d'affranchir la tête et le pied pour amener la brame à la longueur voulue. Après refroidissement, les brames sont visitées, débarrassées de leurs défauts superficiels et stockées en vue de leur laminage sur le train continu. Après réchauffage dans des fours à 1200-1300 °C durant 2 h 1/2, les brames sont dirigées vers le train à chaud qui comporte, en ligne, successivement :

— un ensemble de cages dégrossisseuses (fig. II-20) constitué par une cage verticale, une cage duo décalamineuse, une cage quarto élargisseuse.

— trois cages quarto précédées chacune d'une cage verticale qui lui est accolée. Pendant tout son parcours, la brame n'est en prise que dans une seule cage à la fois. À la sortie, l'ébauche a une épaisseur comprise entre 19 et 25 mm et peut avoir jusqu'à 40 m de longueur.

Elle est à nouveau éboutée, débarrassée de l'oxyde qui a pu se former pendant les passes de dégrossissage, puis introduite dans le train finisseur (fig. II-21), composé de six cages quarto où elle est ramenée à une épaisseur qui peut descendre à des épaisseurs comprises entre 1,2 mm et 2,1 mm pour des bandes de largeur comprise entre 0,80 m et 1,85 m. La bande est en prise simultanément dans les six cages, ce qui exige un réglage très précis des vitesses des cages.

Les tôles de moins de 7 mm d'épaisseur sont bobinées à chaud en fin de chaîne; celles d'épaisseur supérieure sont coupées à longueur convenable à l'aide d'une cisaille volante.

La tôle peut être vendue dans cet état, après diverses opérations de finition. Mais le plus souvent elle est reprise en *laminage à froid*, pour réduire son épaisseur, et recuite en atmosphère neutre pour lui conférer des propriétés particulières : tolérances d'épaisseur très serrées, surface propre et lisse, grain fin et structure homogène, très bonnes caractéristiques mécaniques.



Fig. II-21

Train à chaud : cages finisseuses (*S.O.L.L.A.C.*)

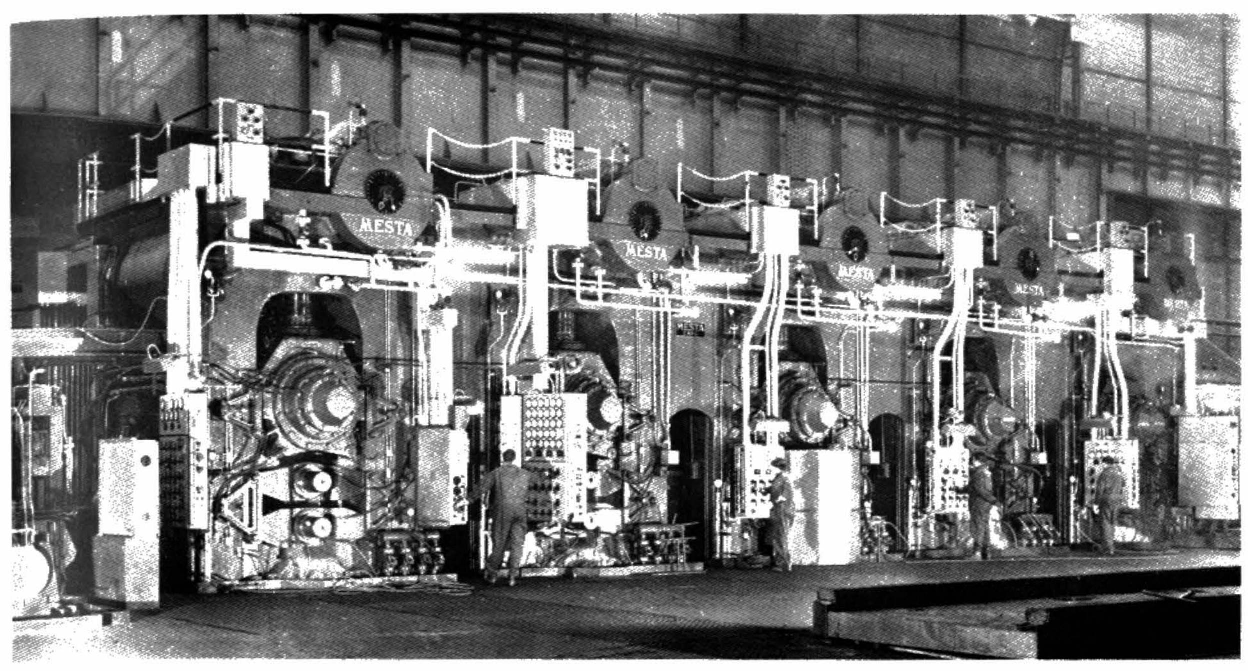


Fig. II-22 — Train à froid (*S.O.L.L.A.C.*)

Les *trains à froid* sont composés de cages quarto au nombre de trois ou cinq (fig. II-22), placées très près les unes des autres, et entre lesquelles la bande subit une traction considérable, souvent voisine de sa limite de rupture. Avant son introduction dans le train, la bande est décapée à l'acide, rincée, séchée, huilée et rebobinée. À la sortie, elle est enroulée à nouveau et dirigée vers le four à recuit. La vitesse de déroulement de la bande peut atteindre 110 km/h. L'opération de recuit est indispensable pour faire disparaître l'écrouissage subi par la bande au cours du laminage à froid. Elle s'opère soit dans un four continu, soit dans des fours à cloches, sous protection d'un gaz neutre.

2° *Fabrication des produits profilés.* — Elle est en général beaucoup moins automatisée que celle des produits plats. La grande variété des profils et des sections nécessite le plus souvent l'utilisation des mêmes engins pour l'exécution de toute une gamme de produits, ce qui entraîne le changement fréquent des cylindres de laminoirs.
Cependant, en tête de l'installation de laminage on trouve toujours un blooming alimenté en lingots à partir de fours pits, et qui, en une dizaine de passes, transforme le lingot en un bloom de forme carrée, ayant une section de 15×15 cm^2 à 20×20 cm^2.
Après éboutage, l'opération de dégrossissage est parfois poursuivie jusqu'à une section plus faible (10×10 cm^2), dans un train à billettes, généralement trio. Le demi-produit (bloom ou billette) est alors refroidi, soit à l'air libre sur un refroidissoir, soit sous cendres, pour être vérifié et débarrassé de ses défauts de surface.

Le laminage est alors poursuivi, après réchauffage dans des fours spéciaux : fours poussants (fig. II-23), fours à sole mobile dans des trains finisseurs, parmi lesquels on citera :

— *Les gros trains à profilés* constitués de trois, quatre ou même cinq cages duo placées côte à côte avec une machine d'entraînement à chaque extrémité. Ces cages sont réversibles et le produit passe successivement dans chacune d'elles, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Un équipement normal est constitué par deux trains utilisés alternativement de manière à procéder aux échanges de cylindres suivant les profils désirés.

— *Les trains trio* utilisés pour des profils de plus faible section. Ils sont constitués généralement par un échelon dégrossisseur à une ou deux cages, suivi de trois ou quatre cages finisseuses. Le produit est laminé, dans chaque cage, tantôt d'avant en arrière, tantôt d'arrière en avant, sans changement du sens de rotation des cylindres.

2.3. Transformations des produits semi-finis. — Afin d'obtenir les objets métalliques tels qu'ils sont utilisés couramment, les produits semi-finis subissent une mise en forme finale. On distingue les opérations effectuées à chaud et les opérations effectuées à froid.

2.3.1. Transformations à chaud

1° *Moulage.* — Cette opération consiste à fondre un métal ou un alliage dans un four à creuset, et à le couler dans un moule (à la forme de la pièce à obtenir) où il se solidifie.

2° *Forgeage.* — C'est la mise en forme par chocs de métaux ou d'alliages portés à température élevée. Le forgeage est réalisé au moyen de marteaux pilons, de moutons, ou de presses hydrauliques. En général, le forgeage est suivi d'une opération d'usinage. Le poinçonnage et le matriçage à chaud peuvent être considérés comme des modes particuliers de forgeage.

3° *Filage.* — Il permet d'obtenir des profils divers, des tubes, en faisant écouler sous pression au travers d'une filière de forme, un métal solide à température élevée.

4° *Frittage.* — Ce procédé consiste à fabriquer des pièces de forme plus ou moins complexes par compaction sous pression de poudres au moyen de presses hydrauliques. La cohérence est ensuite assurée par l'agglomération des grains, sous l'effet de la diffusion obtenue en maintenant la pièce à une température élevée mais inférieure à la température de fusion.

2.3.2. Transformations à froid

1° *Étirage et tréfilage.* — Ces méthodes permettent d'élaborer des profils ou des fils de section parfaitement déterminée par forçage du métal à travers des filières constituées d'éléments fixes ou mobiles dont l'ouverture a la forme du profil à obtenir.

2° *Formage par choc.* — Dans cette catégorie rentrent deux méthodes de mise en forme : l'*estampage* destiné à fabriquer des objets par mise en forme de produits plats (flancs) frappés entre deux empreintes ; le *filage par choc* qui consiste à obtenir un tube, ou un profil, par frappe d'un lopin et filage du métal le long du poinçon.

3° *Repoussage.* — Il consiste à déformer un flanc au moyen d'un poussoir qui permet d'appliquer le métal sur un mandrin entraîné par un tour. Dans cette rubrique on peut inclure comme méthode voisine, le *fluotournage :* en partant d'une ébauche massive, on obtient la pièce par fluage, provoqué également par un poussoir.

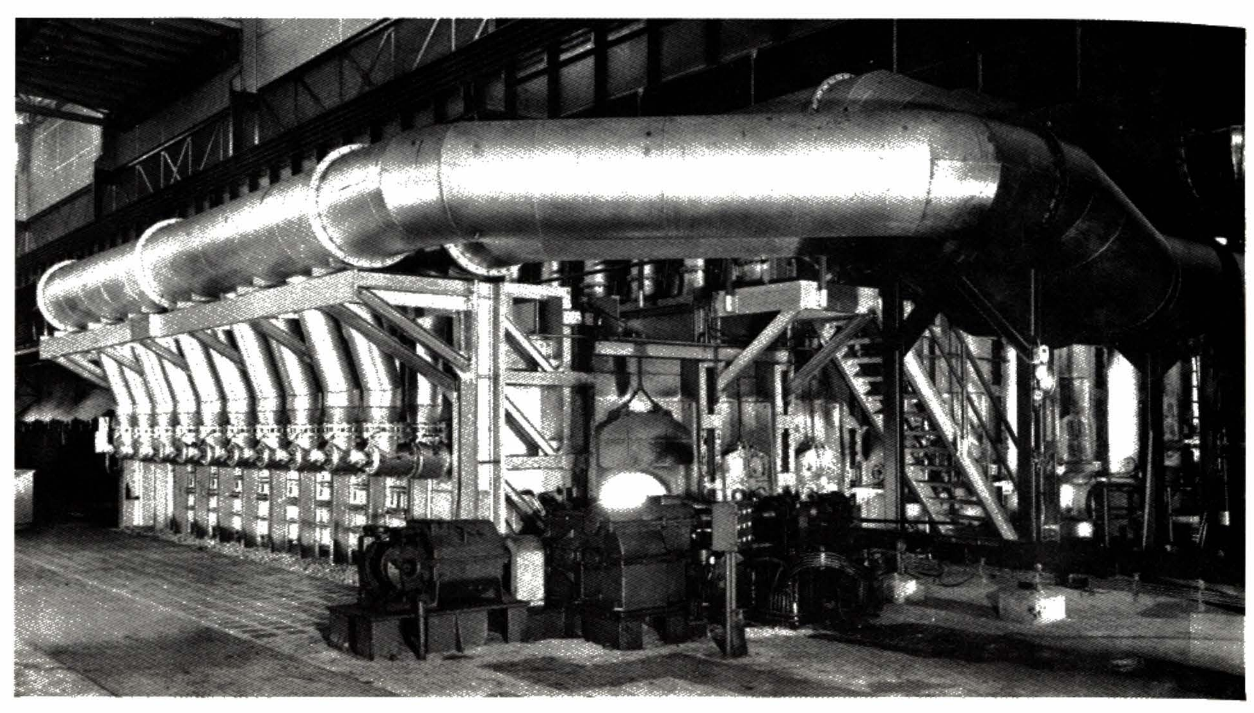


Fig. II-23 — Four poussant (*Heurtey — Sidelor Rombas*)

4° *Découpage et emboutissage.* — La première opération, le découpage, permet d'obtenir des pièces plates de contours plus ou moins complexes. La deuxième opération conduit à l'obtention de produits creux par déformation du flanc entre une matrice et un poinçon appliqué par une presse mécanique ou hydraulique dans ce type d'opération. Il est également possible d'inclure le *formage par explosif* (l'outil actif étant l'onde de choc), ou le *gonflage* (l'outil actif étant un liquide sous pression).

2.3.3. Opérations diverses. — Les opérations de mise en œuvre des métaux sont extrêmement nombreuses, et parmi celles-ci, on peut encore distinguer un grand nombre de méthodes.

1° *Mise en forme manuelle.* — Dans le cas de métaux en feuille, on parle de *chaudronnerie.* Cette mise en forme, correspond à des opérations telles que : dressage, cisaillage, perforation, chanfreinage, étirage des pinces, cintrage, pliage, formage. Dans le cas de métaux massifs, on parle d'*ajustage à la lime.*

2° *Mise en forme par enlèvement de matière.* — L'enlèvement de matière résulte d'opérations telles que : sciage, rabotage, tournage, décolletage (par tours automatiques pour les grandes séries), mortaisage, fraisage, perçage, brochage, alésage, étincelage, usinage chimique ou par ultrasons ; chacune de ces méthodes nécessite des types de machines spécifiques.

3° *Assemblage.* — Il est fréquent de vouloir assembler différentes pièces obtenues par les procédés précédemment rappelés. On utilise alors des méthodes telles que : rivetage, boulonnage, agrafage, collage. Les procédés de soudage et de brasage qui permettent d'assembler les métaux à chaud, par diffusion, avec ou sans métal d'apport, sont très nombreux ; soudage à la forge, soudage autogène (à l'arc ou au chalumeau), soudage au trempé par pression, soudage par point, par résistance, par bombardement électronique, par ondes de choc.

4° *Traitements de surfaces.* — Ces traitements sont destinés à protéger les surfaces métalliques de la corrosion ou à leur faire acquérir un aspect décoratif, ce que l'on peut obtenir simultanément. Ces traitements sont toujours précédés par des opérations de préparation : sablage, grenaillage, roulage, décapage, dégraissage, polissage (mécanique, chimique ou électrolytique). Le revêtement de la surface peut être obtenu par dépôt électrolytique (nickelage, zingage, chromage, etc.), par oxydation anodique (pour l'aluminium et certains de ses alliages), par peinture et par plastification.

CHAPITRE III
MÉTALLURGIES PARTICULIÈRES

1. MÉTALLURGIE DU FER

1.1. Élaboration

1.1.1. Préparation des minerais. — Comme on l'a vu, les minerais ne sont pas utilisés tels qu'ils arrivent de la mine : ils doivent être traités afin qu'ils puissent être convenablement réduits dans le haut fourneau. Les minerais riches sont concassés en morceaux dont les dimensions sont fonction de la difficulté de la réduction et de la hauteur du fourneau. Les minerais pauvres sont broyés, enrichis par flottation, ou triage magnétique, puis agglomérés. L'agglomération est un procédé en plein développement, même pour les minerais riches, car cette opération améliore la régularité de la marche et le rendement des hauts fourneaux. Le minerai broyé est mélangé à du coke en poudre, et, éventuellement, corrigé par addition de chaux ou de silice ; il est ensuite fritté par passage dans des fours spéciaux (le combustible est allumé et la combustion entretenue par soufflage, ou aspiration, à travers le tapis porteur). L'agglomération est réalisée en continu.

1.1.2. Élaboration de la fonte

1° *Principe général.* — La fonte est élaborée dans un four à cuve de grandes dimensions appelé haut fourneau (fig. III-1, III-2, et III-3). Sa forme est étudiée afin de tenir compte des variations de volume des courants ascendants gazeux et des courants descendants solides puis liquides.

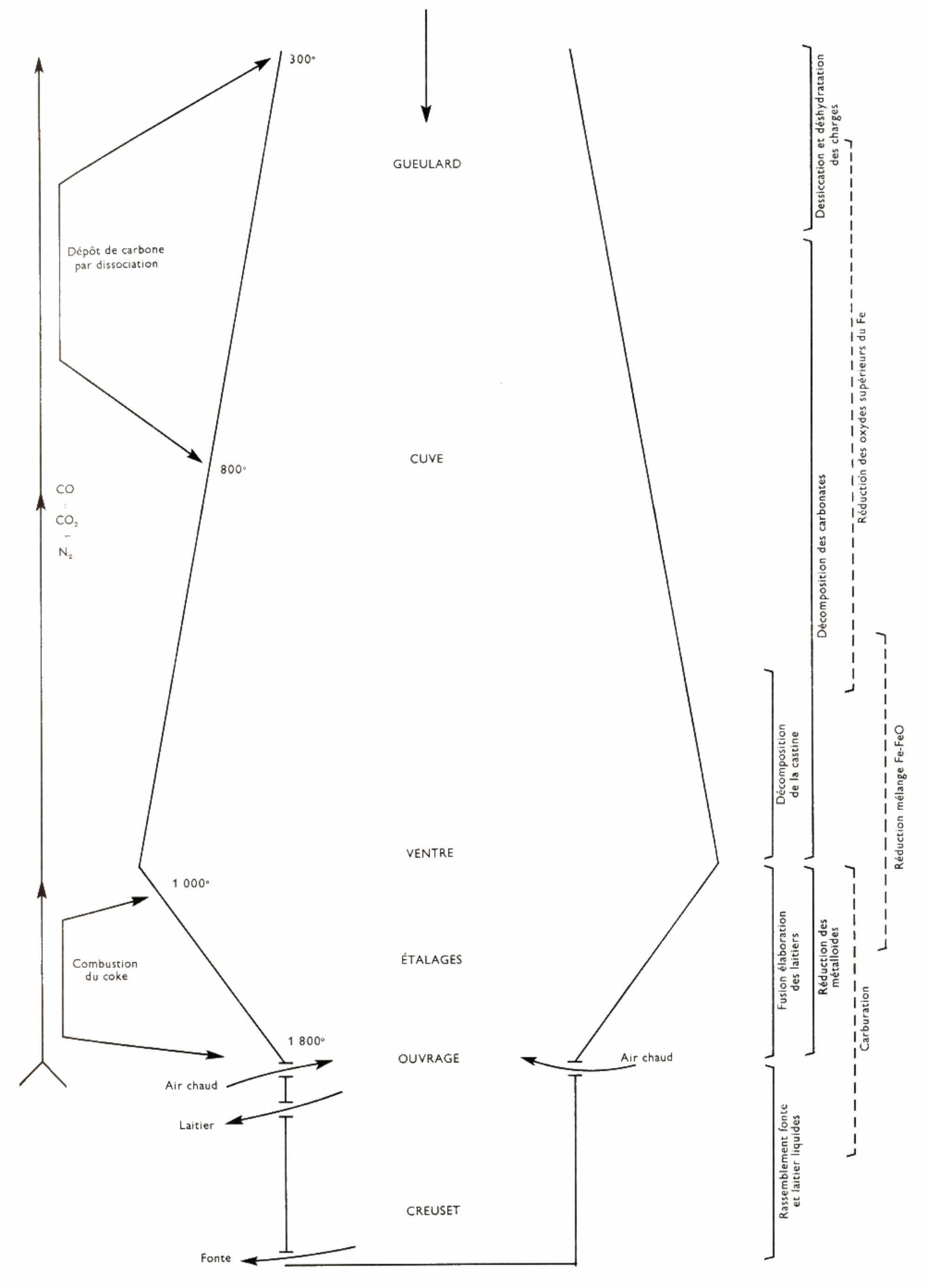


Fig. III-1 — Schéma d'un haut fourneau

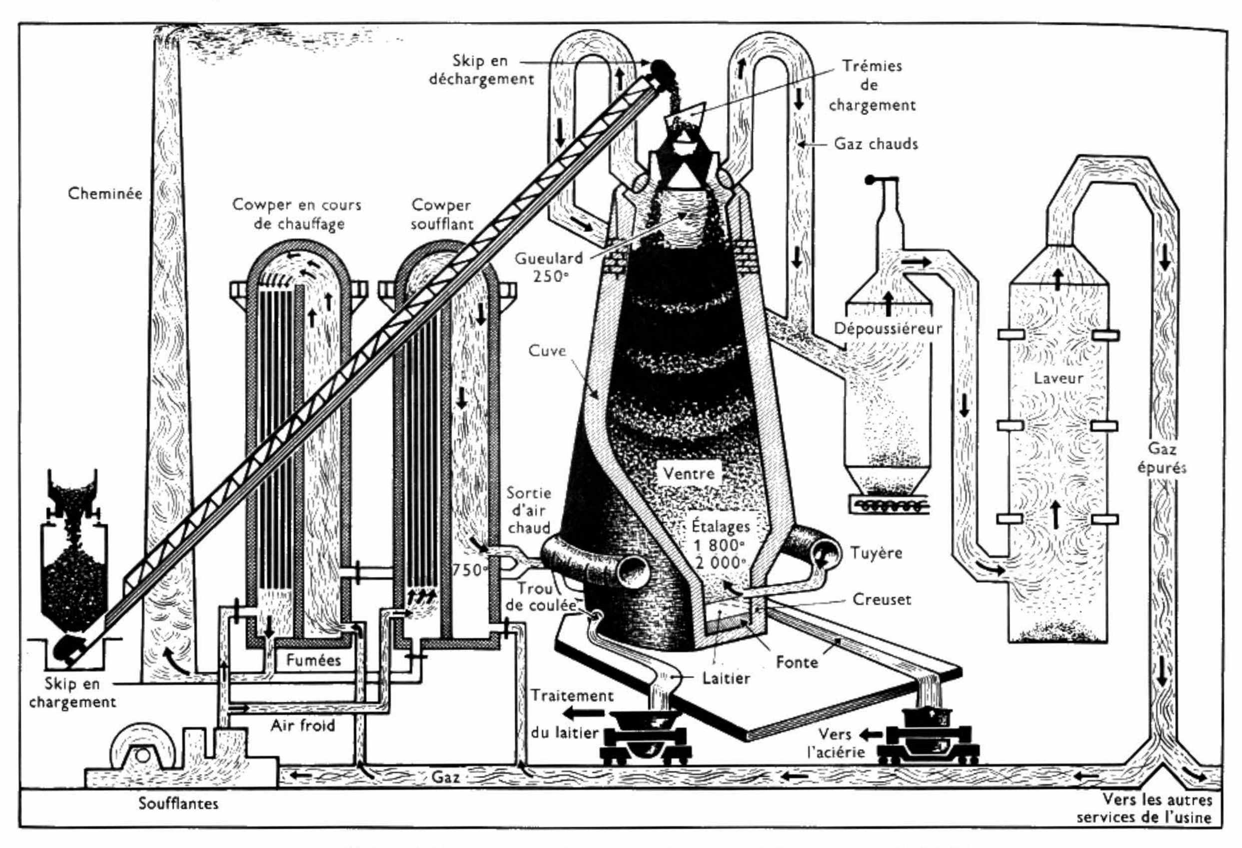


Fig. III-2 — Schéma d'un haut fourneau et de ses installations annexes (*C.S.S.F.*)



Fig. III-3

Deux hauts fourneaux et leurs installations annexes (*La Photothèque*)

Elle permet donc de limiter l'usure en diminuant les frottements et en régularisant la vitesse de descente des charges; ainsi, on favorise les conditions optimales des réactions chimiques. La coque du haut fourneau est réalisée en tôle épaisse; l'intérieur est garni de briques réfractaires. L'extérieur est refroidi soit par ruissellement d'eau, soit par boîtes à circulation d'eau implantées dans la paroi. L'oxygène nécessaire aux réactions est insufflé à la base des étalages au moyen de tuyères, sous forme d'air réchauffé, quelquefois enrichi en oxygène. À la base du haut fourneau, se trouvent deux trous de coulée; l'un pour le laitier, l'autre pour la fonte.

Le haut fourneau est chargé de minerai ou d'agglomérés, de castine destinée à fournir les éléments manquants pour obtenir un laitier convenable et de coke. Cette opération se fait au moyen de bennes, appelées *skips*.

Les gaz qui s'échappent du haut fourneau sont récupérés car ils ont une valeur énergétique importante. Ils sont dépoussiérés et leur chaleur sensible (due à leur température élevée) est récupérée dans des tours garnies de briques, appelées *cowpers*. La chaleur emmagasinée dans les cowpers sert à réchauffer le vent des tuyères. Ces appareils fonctionnent par paire, l'un étant en chauffe pendant que l'autre sert de réchauffeur. La chaleur latente de ces gaz riches en oxyde de carbone est utilisée dans des centrales thermiques.

La marche du haut fourneau doit être surveillée avec soin car elle conditionne la qualité des produits et le rendement de l'appareil. Une mauvaise conduite peut amener des accidents comme les accrochages, et la formation de voûtes; ce dernier accident très sérieux n'est souvent éliminé que par le dynamitage de la voûte.

2° *Réaction dans le haut fourneau*. — Le haut fourneau est un réacteur chimique complexe. Les oxydes de fer sont réduits par l'oxyde de carbone (CO) produit lors des réactions à haute température, celle-ci favorisant la formation de ce composé (l'équilibre entre la quantité de gaz carbonique (CO_2) et celle d'oxyde de carbone (CO) dépend de la température). En haut du haut fourneau les températures sont peu élevées, le gaz carbonique est abondant: Fe_2O_3 est réduit en Fe_3O_4, le fer et FeO sont oxydés en Fe_3O_4. Au milieu de la cuve, la teneur en oxyde de carbone atteint 50 %, Fe_2O_3 et Fe_3O_4 sont réduits en FeO et le fer est oxydé en FeO. Au niveau du ventre, tous les oxydes sont réduits et donnent du fer. Ce dernier se carbure, et, par suite de l'abaissement du point de fusion consécutif à son alliage avec le carbone, il s'écoule dans le creuset (fig. III-4).

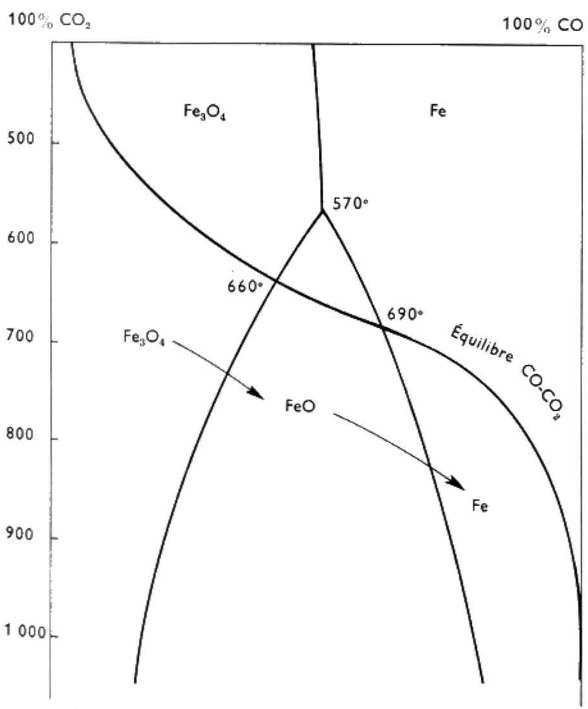


Fig. III-4 — Principe de la réduction des oxydes de fer par le mélange CO-CO²

Les oxydes de phosphore, de manganèse et de silicium sont réduits par CO en présence d'un excès de carbone. Ces éléments se partagent inégalement entre la fonte et le laitier. Le laitier a une action importante dans les réactions, il a notamment un rôle épurateur en divers éléments: acide il retient le manganèse, basique il retient le phosphore et éventuellement le soufre si l'allure est chaude. Le soufre, élément très nuisible, est introduit par le coke et éventuellement par les minerais. Le laitier, outre son rôle d'épurateur, a également un rôle de fondant; s'il est très réfractaire, la teneur de la fonte en manganèse et en silicium augmente.

Les fontes peuvent être produites sous forme de fontes grises ou de fontes blanches. Dans la fonte grise, la concentration en silicium est d'environ 2 %, celle en carbone est relativement faible (2,5 à 3 %), celle en manganèse est voisine de 0,8 %, celle en soufre et en phosphore est faible. Dans cette fonte, le carbone apparaît sous forme de graphite en écailles, en rosettes ou en sphères (par adjonction de magnésium); la matrice peut être perlitique (avec ou sans présence de cémentite) ou ferritique. La diminution de la teneur en silicium provoque la formation de fonte blanche où le carbone ne se trouve plus à l'état libre mais sous forme de carbure de fer, Fe_3C, appelé *cémentite*. Les fontes peuvent être affinées pour fabriquer des aciers. Selon le type de fonte, on utilise différentes méthodes d'affinage: Bessemer, Thomas, Martin, etc.

1.1.3. Élaboration de l'acier. — L'acier est élaboré à partir de la fonte provenant du haut fourneau. Cette élaboration consiste essentiellement en une décarburation de la fonte par oxydation du carbone. Une épuration en différents métalloïdes accompagne la décarburation.

1° *Préparation de la fonte*. — La fonte est stockée dans de grands réservoirs tournants garnis de produits réfractaires, appelés *mélangeurs*. Ces mélangeurs permettent d'équilibrer la production de fonte et la marche de l'aciérie en servant de tampon; ils permettent d'absorber les à-coups de la production.

L'épuration de la fonte commence dans le mélangeur; elle y est débarrassée du soufre et du silicium. Le soufre est éliminé par addition de manganèse. Le sulfure de manganèse se concentre dans la scorie et, au contact de l'air, il s'oxyde pour donner MnO et du gaz sulfureux SO_2 qui se dégage. La teneur en soufre passe de 0,2 à 0,06 %. La teneur en silicium est abaissée par addition de chaux.

2° *Procédés d'élaboration*. — Suivant la nature de la fonte, la qualité de l'acier que l'on désire obtenir et les conditions économiques de l'élaboration, il est possible de choisir parmi plusieurs procédés.

— *Le puddlage*. — Cité pour mémoire, ce procédé n'est plus utilisé. Il consiste à brasser constamment la fonte en fusion dans un four à réverbère en présence d'un courant d'air. On obtient des loupes spongieuses que l'on densifie par cinglage. Production: quatre tonnes par jour.

— *Élaboration au four Martin*. — Ce procédé est utilisé pour obtenir des aciers de qualité. Cependant, les perfectionnements récents de l'élaboration au convertisseur font qu'il est maintenant concurrencé par d'autres procédés.

Le four Martin (fig. III-5 et III-6) est un four à voûte de grandes dimensions, chauffé au moyen de brûleurs utilisant du gaz ou du mazout. La voûte est constituée d'un réfractaire dit acide (siliceux); la sole est soit acide, soit basique (briques de magnésie). Les matières à traiter sont chargées dans le four dans l'ordre suivant: riblons (ferrailles), minerais, fonte (liquide ou solide), battitures (oxyde de fer provenant du laminage à chaud), sable ou brique pilée. Après la fusion des charges, commence l'affinage par contact avec l'atmosphère du four. On distingue:

- La marche acide (sole siliceuse): dès le début, le silicium s'élimine lentement, et donne du silicate de fer qui passe dans la scorie. Ensuite, l'oxydation du manganèse se produit avec formation de silicate et passage dans la scorie (le manganèse est un limitateur d'oxydation du bain). Lorsque la température devient suffisante, le carbone s'élimine; cette opération peut être accélérée par addition de minerai et de battitures.
- La marche basique (sole en dolomie): l'élimination du silicium est rapide et complète; celle du manganèse est

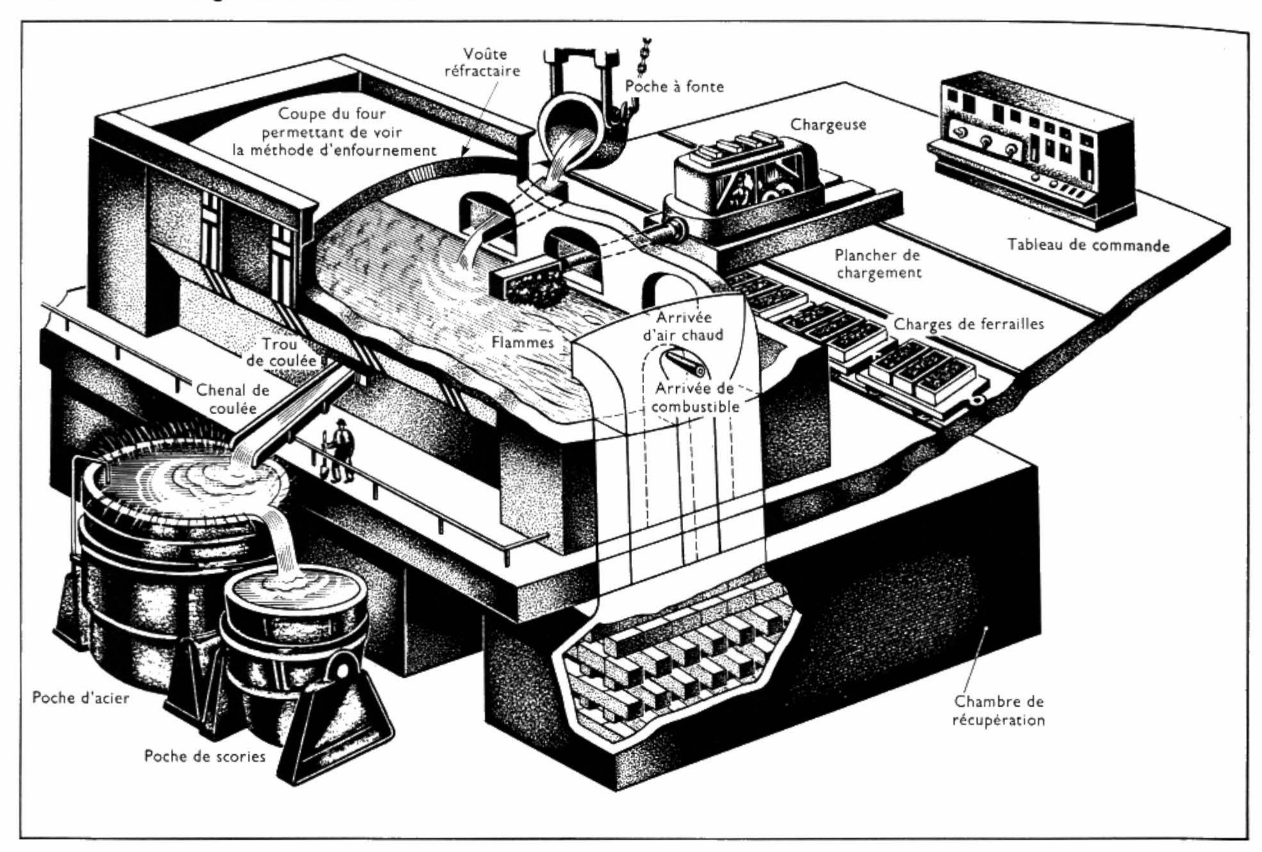


Fig. III-5 — Principe de l'élaboration de l'acier dans le four Martin (*C.S.S.F.*)

Fig. III-6 — Four Martin (*S.O.L.L.A.C.*)

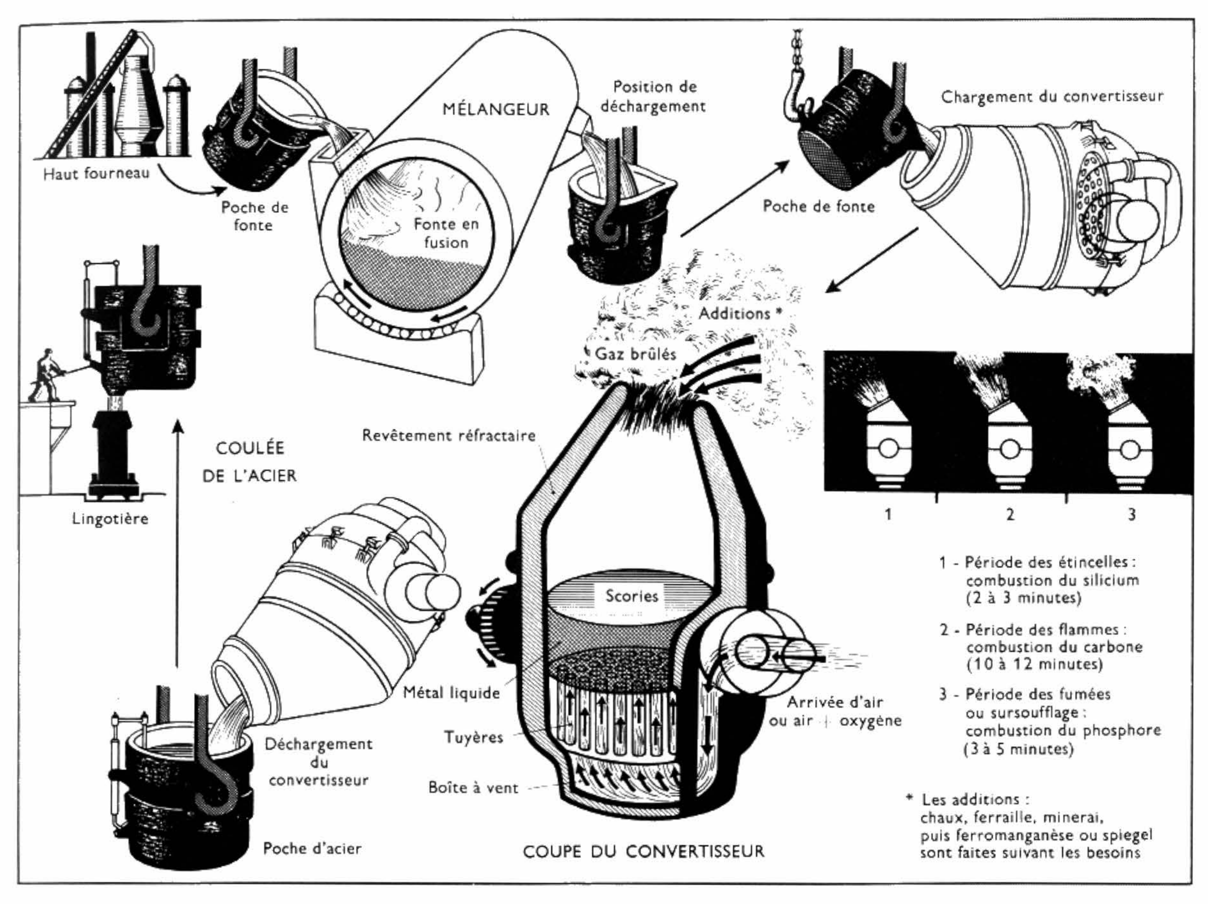


Fig. III-7 — Principe de l'affinage au convertisseur (*C.S.S.F.*)

plus lente mais sa présence dans le bain permet d'éliminer le soufre en fin d'opération, au moins partiellement. Le carbone s'élimine dès le début mais le processus est accéléré par la présence de chaux. La grande basicité permet l'élimination du phosphore par formation de phosphates tricalcique et tétracalcique en présence de chaux.

En fin d'opération, le bain métallique est décrassé, et les teneurs en différents éléments sont ajustées par addition de ferros.

Les fours Martin atteignent des capacités de 200 t et permettent 3 à 5 coulées par jour. Différents procédés permettent d'accélérer la marche du four Martin : procédé duplex Thomas-Martin, procédé continu dans un four Martin oscillant, utilisation d'oxygène, etc.

— *Élaboration au convertisseur* (fig. III-7). — Ce procédé permet d'élaborer des aciers en grande quantité. Les convertisseurs sont des cornues basculantes d'une capacité de 15 à 30 tonnes comportant des tuyères pour le soufflage de l'air. L'extérieur est constitué d'une coque métallique ; l'intérieur est garni d'un revêtement réfractaire. Le revêtement est acide (briques à base de silice) dans les convertisseurs Bessemer ; il est basique (briques de dolomie) dans les convertisseurs Thomas. Ces deux types de convertisseurs sont utilisés selon la nature de la fonte à traiter.

— Le *convertisseur Bessemer* est destiné à traiter les fontes non phosphoreuses. La fonte est introduite dans le convertisseur basculé ; le « vent » est mis en route, et le convertisseur redressé. La température de fusion du bain métallique s'élève à mesure que les impuretés sont éliminées mais l'oxydation de ceux-ci dégage une quantité de chaleur suffisante pour élever la température du bain métallique, et le maintenir liquide.

On distingue plusieurs phases dans la conduite de l'opération :

1re période : étincelles. Le silicium est oxydé dès le début et il passe dans la scorie ; la température du bain s'élève. Le silicium est l'élément principal de l'opération Bessemer. Le manganèse est oxydé dès le début mais moins rapidement que le silicium ; il passe également dans la scorie sous forme de silicate, et son oxydation contribue aussi à l'élévation de température. La température atteint 1 650 °C à la fin de cette phase.

2e période : flammes. Cette phase ne commence qu'après le départ de la majeure partie du silicium. Il y a alors oxydation du carbone. Des flammes courtes et bleues, puis longues et blanches, dues à la combustion de l'oxyde de carbone, apparaissent.

3e période : fumées. La décarburation est terminée et des fumées brunes contenant de l'oxyde de fer et de l'oxyde de manganèse apparaissent.

4e période : raffinage. Des additions convenables (spiegel, ferromanganèse) sont effectuées pour ajuster la teneur du métal en carbone et en éléments d'alliage. Après ces additions, le métal est coulé en poche.

L'opération dure environ douze minutes. Le procédé Bessemer, qui a été le premier utilisé, ne permet pas l'affinage en phosphore et en soufre ; il est maintenant moins répandu que le procédé Thomas.

— Le *convertisseur Thomas* est destiné à traiter les fontes phosphoreuses. Le phosphore est éliminé par réaction avec le garnissage basique et avec la chaux, introduite au début de l'opération pour éviter une usure prématurée du garnissage et assurer des réactions optimales. La concentration en silicium doit être basse (0,4 à 0,6 %).

Comme dans l'opération Bessemer on distingue plusieurs périodes :

1re période : étincelles. Le silicium et le manganèse sont oxydés rapidement et complètement, et ils passent dans la scorie. À la fin de cette phase, la température atteint 1 300 °C environ.

2e période : flammes. Le carbone s'oxyde régulière-

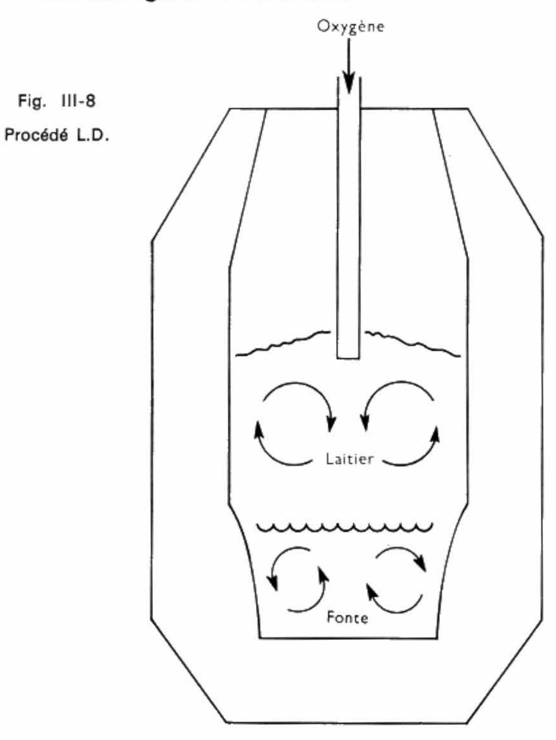


Fig. III-8
Procédé L.D.

ment mais la température reste peu élevée. La décarburation doit être totale afin de pouvoir éliminer le phosphore.

3e période : fumées. La décarburation est terminée. Le phosphore brûle selon la réaction suivante :

$$2P + 5FeO + 4CaO \rightarrow P_2O_5, 4CaO + 5\ Fe$$

Il se produit un fort dégagement de chaleur ; après la période de sursoufflage, la température atteint 1 700 °C.

Dans le procédé Thomas, le phosphore est l'élément thermogène principal. En prolongeant un peu le soufflage, on élimine faiblement le soufre.

4e période : décrassage et raffinage. La scorie est évacuée par manœuvre du convertisseur. Le décrassage effectué, il est nécessaire de recarburer le bain, le procédé Thomas provoquant une décarburation totale (puisque le phosphore ne peut être éliminé qu'après le départ du carbone). La recarburation est réalisée au moyen de ferros dans le convertisseur et de spiegel liquide dans la poche de coulée.

L'opération dure environ vingt minutes.

Des perfectionnements récents permettent d'améliorer notablement la qualité des aciers Thomas. Un procédé, mis au point par l'Institut de recherches de la sidérurgie française (IRSID), consiste à injecter de l'azote chargé de poudre de chaux dans le bain : cela permet d'abaisser la concentration en soufre de 0,3 % à 0,004 %. On obtient une nette amélioration en utilisant de l'air suroxygéné (40 % d'oxygène), avec ou sans adjonction de minerai de fer ; en réagissant avec le phosphore et le carbone, l'oxygène produit une vive effervescence qui entraîne l'azote.

Cependant actuellement, on constate un développement de plus en plus important de procédés dits *à l'oxygène* qui tendent de plus en plus à remplacer les autres méthodes. On distingue :

— Le *procédé L.D.* (Linz-Düsenverfahren), procédé où l'on injecte, au moyen d'une lance spéciale, de l'oxygène pur au-dessus du bain contenu dans une cornue. Le phosphore brûle très rapidement et la déphosphoration est terminée, alors que le bain n'est pas encore fortement décarburé. L'opération de sursoufflage est alors inutile (fig. III-8).

— Le *procédé Kaldo* qui utilise le principe précédent mais dans un four tournant (fig. III-9 et III-10), ce qui permet, d'une part, d'obtenir un laitier phosphoreux très fluide sans avoir recours à des fondants (spath, bauxite), et, d'autre part, de l'éliminer en continu au cours de l'opération.

— Le *procédé O.L.P.* (fig. III-11), dont le principe est une combinaison de celui mis au point par l'IRSID et du procédé à l'oxygène. De l'oxygène, entraînant avec lui de la chaux finement divisée, est injecté au-dessus du bain contenu dans une cornue. Il se forme rapidement un laitier très liquide qui neutralise l'acide phosphorique.

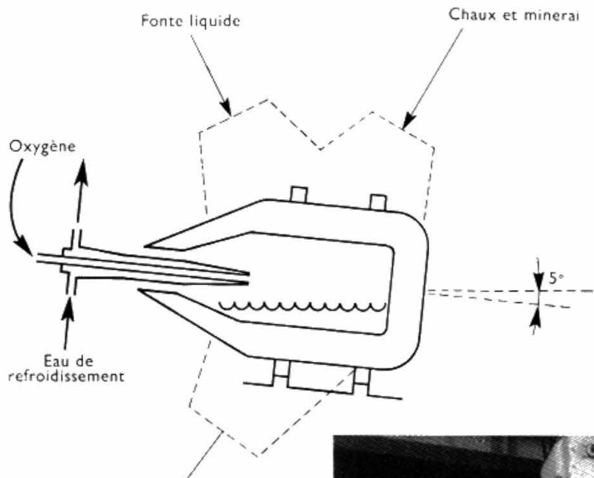


Fig. III-9
Procédé Kaldo

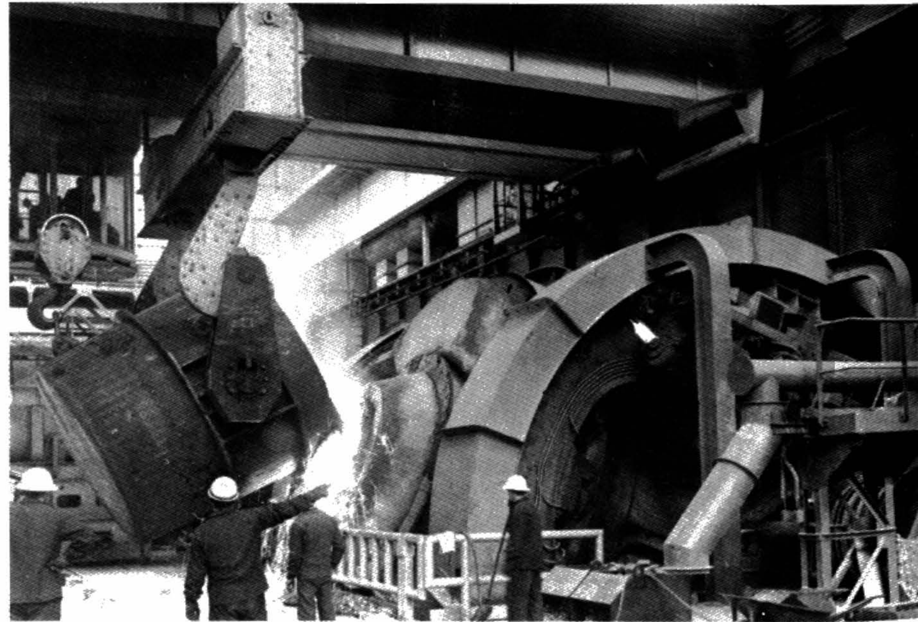


Fig. III-10
Four Kaldo
(*S.O.L.L.A.C.*)

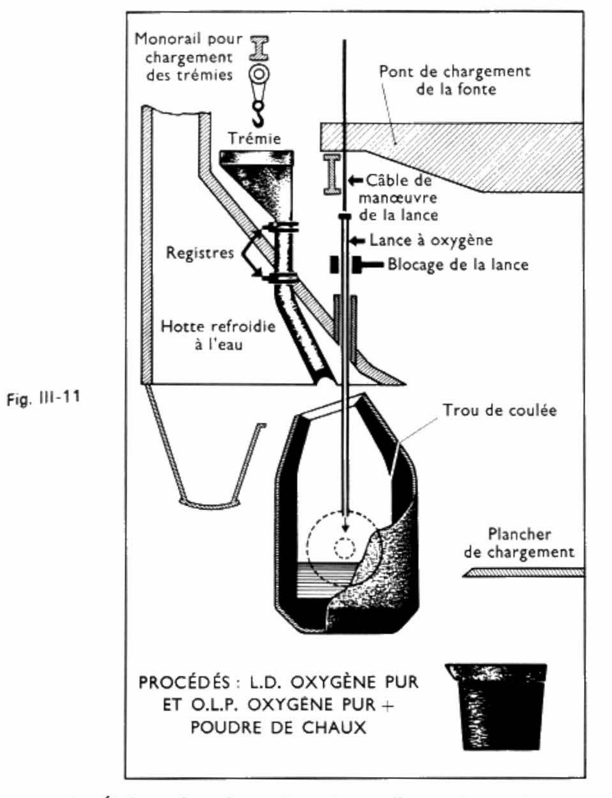


Fig. III-11

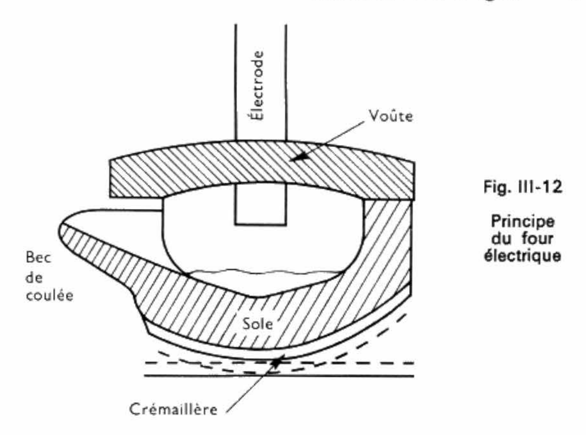


Fig. III-12

Principe du four électrique

3° *Élaboration des aciers de qualité.* — Les aciers de qualité sont élaborés au four électrique c'est-à-dire dans un réacteur de faible capacité (5 à 40 tonnes). On distingue deux types de fours : les fours à arc et les fours à induction.

— Un *four à arc* comporte une sole isolante, et l'arc éclate entre deux ou trois électrodes (four Heroult) ou une sole conductrice et, dans ce cas, l'arc éclate entre la ou les électrodes et le bain métallique. La tension de fonctionnement en général est peu élevée ; en revanche l'intensité du courant atteint plusieurs milliers d'ampères. Les électrodes sont en graphite ; on utilise fréquemment des électrodes continues du type Söderberg. Selon le type d'affinage désiré, acide (pour les fontes non phosphoreuses) ou basique (pour les fontes phosphoreuses), les soles sont siliceuses ou à base de dolomie (fig. III-12, III-13 et III-14).

— Les *fours à induction* sont surtout utilisés pour les élaborations rapides, sans affinage, d'aciers purs à faible teneur en carbone et à teneur élevée en éléments spéciaux. Ces fours peuvent fonctionner soit en haute, soit en basse fréquence. Certains permettent un double régime, et le travail soit sous vide soit sous atmosphère contrôlée. Leur capacité est faible : quelques centraines de kilogrammes à quelques tonnes.

Les réactions sont analogues à celles du four Martin mais le brassage intense du bain et la possibilité d'utiliser éventuellement plusieurs laitiers (selon le stade de l'épuration) permettent de pousser celle-ci beaucoup plus loin et d'obtenir des produits de meilleure qualité. Comme dans toutes les autres opérations d'affinage, les aciers sont ajustés en fin de traitement par addition de ferros.

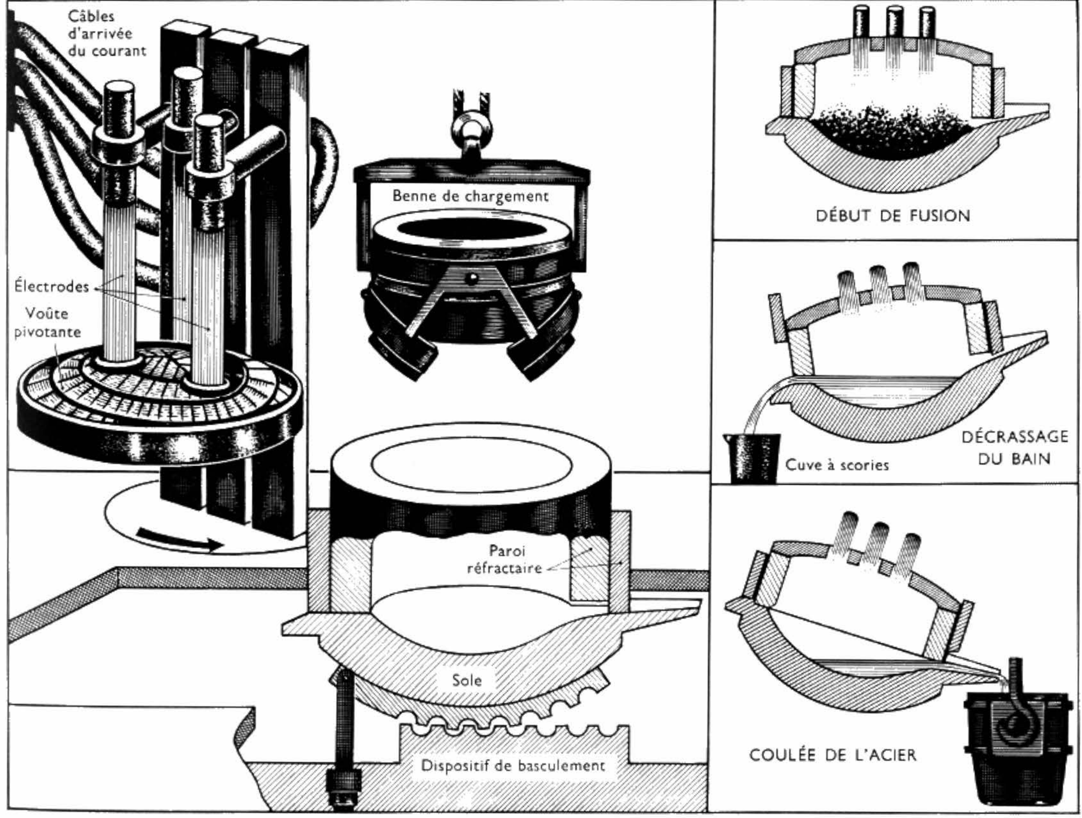


Fig. III-13 — Principe de l'élaboration de l'acier dans le four électrique à arc *(C.S.S.F.)*

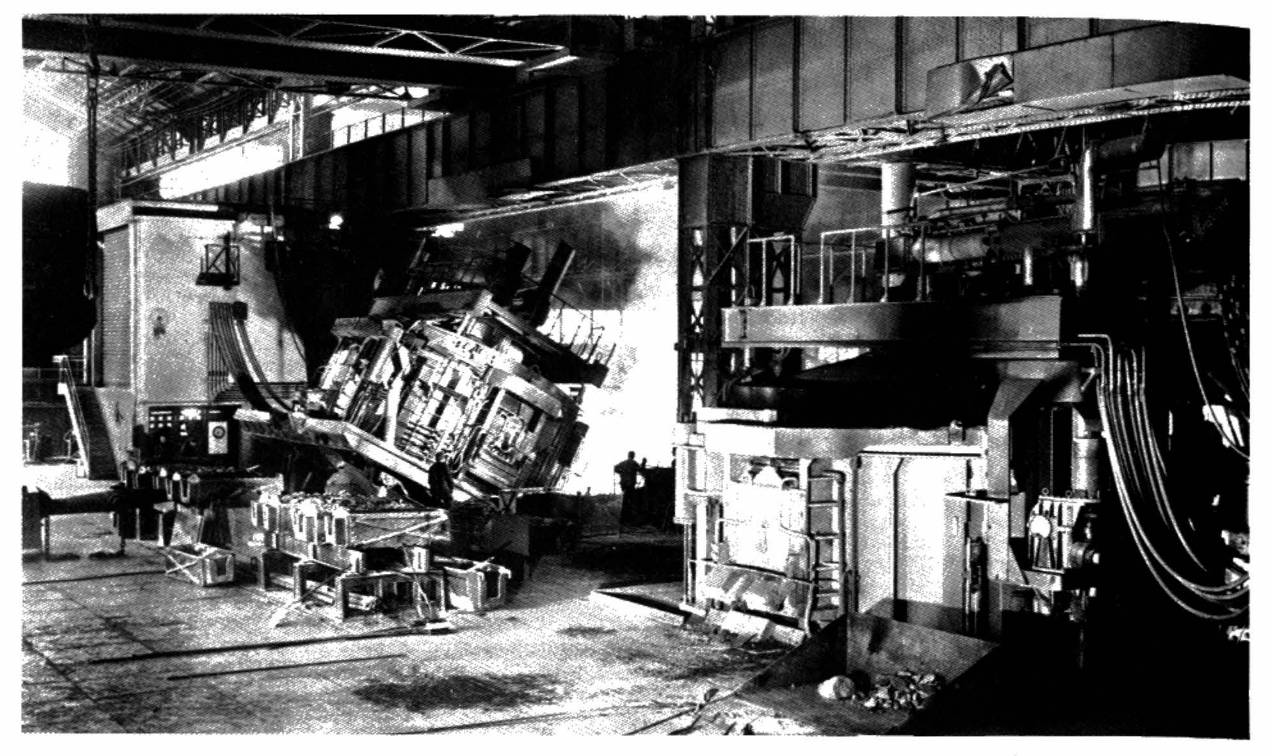


Fig. III-14 — Deux fours électriques triphasés de 70 t (*Société des forges et ateliers du Creusot*)

Dans les fours électriques on peut utiliser des charges liquides provenant des convertisseurs, et opérer ainsi un superaffinage avec élimination du soufre et du phosphore résiduel et désoxydation du bain.

4° *Affinage des aciers de qualité.* — La présence d'oxygène dissous dans le bain métallique donne des aciers dits effervescents. L'oxygène provoque le vieillissement. L'addition d'éléments très oxydables (comme l'aluminium) qui se combinent avec l'oxygène pour former des oxydes, permet d'obtenir des aciers « calmés ».

Outre l'oxygène, l'acier contient également d'autres gaz dissous : l'hydrogène qui provient de la décomposition à haute température de l'eau introduite avec les charges et qui provoque la formation de flocons, l'azote qui provient de l'air de soufflage et provoque la fragilité à basse température et le vieillissement. La coulée des aciers sous vide provoque un dégazage intense, et permet d'éliminer la majeure partie des gaz dissous.

1.1.4. Fabrication des fers purs. — L'utilisation industrielle des fers purs est faible ; ceux-ci sont cependant employés comme matière première de produits très purs.

On les obtient par différents procédés :

1° *Fer électrolytique.* — Par une électrolyse à anode soluble : l'anode est en fonte, la cathode en fer et l'électrolyte est constitué de sulfate ou de chlorure ferreux. On obtient un fer très pur contenant :

C = 0,003 % ; Si = 0,006 % ; P = 0,007 % ; S = 0,005 %

soit environ de 200 à 300 p.p.m (parties par million) d'impuretés. En revanche, il contient de l'hydrogène occlus qui se dégage lors d'un recuit de deux heures à 1 000 °C.

2° *Fer carbonyle.* — L'oxyde de carbone se combine au fer pour donner du fer carbonyle $Fe(CO)_5$ gazeux à une température supérieure à 43 °C et qui, après dissociation,, donne du fer très pur. Le métal contient cependant une quantité non négligeable de carbone et d'oxygène.

Divers autres procédés peuvent être utilisés, par exemple : utilisation de l'hydrogène pour réduire du minerai désulfuré (procédé A.R.M.C.O.). Dans ce cas, dans de petits fours Martin on réalise un superaffinage, par aluminothermie :

$$Fe_2O_3 + 2\,Al \rightarrow Al_2O_3 + 2\,Fe$$

Il est possible d'obtenir des fers extrêmement purs par fusion de zone : la teneur en impureté peut atteindre des concentrations inférieures à 50 p.p.m.

1.2. Métallographie du fer et des alliages fer-carbone

1.2.1. Les états à l'équilibre. — Il est commode de figurer les différents domaines d'existence des constituants métallurgiques des alliages, en fonction de la température et de la concentration de l'élément d'addition, au moyen d'un graphique appelé diagramme d'équilibre (chap. 1, § 3.2.2.). La connaissance du diagramme d'équilibre fer-carbone ou diagramme de Roozeboom est indispensable à la compréhension des phénomènes intervenant dans la métallurgie du fer. Deux diagrammes (le diagramme des états métastables et celui des états stables) sont en général superposés. Seul, le premier est à considérer dans l'étude des aciers et de certaines fontes ; le second rend compte des phénomènes dans le domaine des fontes à graphite. Dans le cas du diagramme métastable, on considère l'équilibre fer-carbure de fer (Fe_3C) ; dans le cas du diagramme stable, on considère l'équilibre fer-carbone.

On rappelle que les diagrammes sont divisés en plusieurs zones par des courbes appelées : *liquidus* lorsqu'elles séparent le domaine où les alliages sont entièrement liquides des domaines où le solide commence à apparaître ; *solidus* lorsqu'elles séparent le domaine où les alliages sont entièrement solides du domaine où existe du liquide. À l'état solide, les courbes séparant les différents domaines représentent les limites de solubilité. Les différentes phases en présence sont données sur le schéma III-15. On distingue :

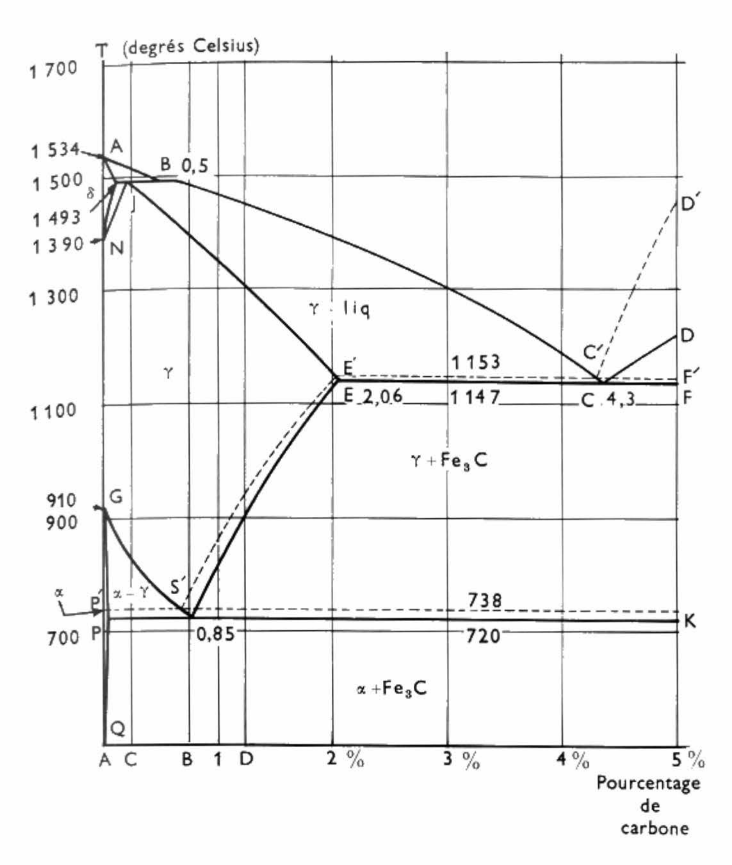
— *la ferrite*, qui est la solution solide de carbone dans le fer α ; elle cristallise dans le système cubique centré ;

— *l'austénite*, qui est la solution solide de carbone dans le fer γ ; elle cristallise dans le système cubique à faces centrées.

— *la cémentite*, qui est le carbure de fer, Fe_3C ; elle cristallise dans le système orthorhombique.

Les conditions d'équilibre font que ces constituants peuvent être deux à deux présents dans certains domaines.

Le domaine des aciers s'étend jusqu'à une concentration de 1,7 % de carbone. À l'équilibre, à température ambiante,



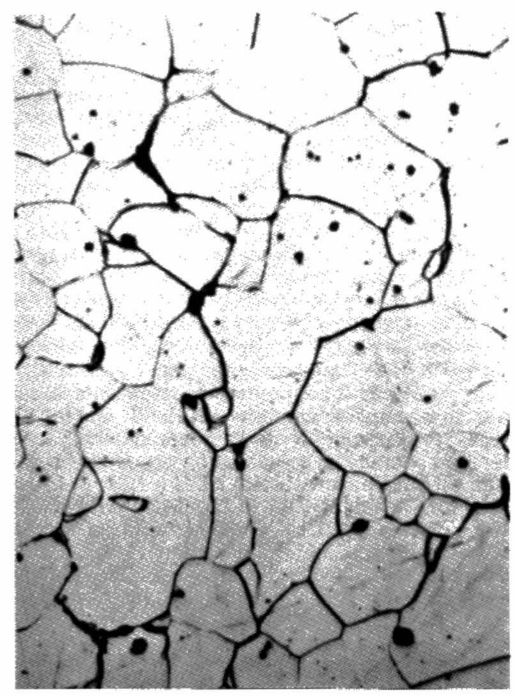


Fig. III-16 — Alliage A attaque nital (4 %) ; présence de quelques îlots de perlite aux joints des grains de ferrite

Fig. III-15 — Diagramme d'équilibre
—— Fer — carbure de fer (stable)
–·–· Fer — carbone (labile)

on constate que l'acier comporte deux constituants, la ferrite et la cémentite ; à partir de 723 °C (température eutectoïde) un nouveau constituant, l'austénite, apparaît en quantité plus ou moins grande selon la température et la concentration en carbone.

Il est possible d'identifier ces différents constituants par examen au microscope métallographique ; cependant, afin de comprendre les structures examinées, il est nécessaire de confronter les résultats de l'observation avec le diagramme d'équilibre.

On considère différents alliages : A, concentration en carbone inférieure à 0,006 % (fig. III-16) ; B, concentration en carbone égale à 0,85 % correspondant à l'eutectoïde (fig. III-17) ; C, concentration en carbone égale à 0,25 % (fig. III-18) ; D, concentration en carbone comprise entre 0,85 et 1,7 % (fig. III-19 page suivante).



Fig. III-17 — Alliage B : perlite lamellaire ; attaque nital (4 %) (X 500) (*Centre technique des industries de la fonderie*)

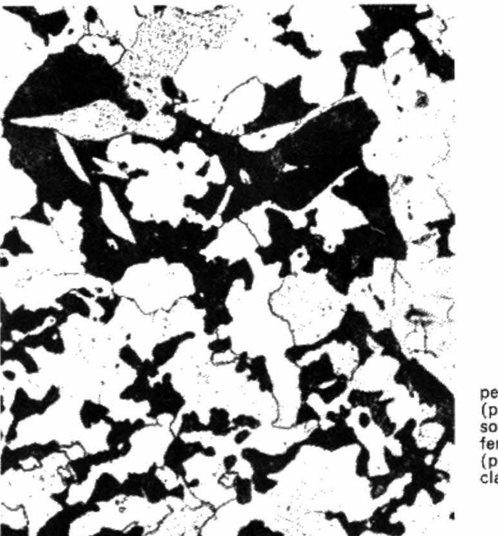


Fig. III-18 — Alliage C (X 100) : acier à 0,25 % de carbone ; attaque nital 4% ; structure ferrite-perlite (*Centre technique des industries de la fonderie*)

Alliage A. — La solidification commence à une température très voisine de la température de solidification du fer pur. L'intervalle de solidification est très petit. Lorsque la température s'abaisse, l'alliage prend successivement la structure ferritique puis la structure austénitique, celle-ci restant stable jusque vers 900 °C. À cette température, le point figuratif de l'alliage traverse la limite de solubilité GS, et de la ferrite proeutectoïde apparaît ; à mesure que la température s'abaisse, la quantité de ferrite croît, et vers 800 °C le point figuratif franchit la limite de solubilité G.P. ; la structure devient entièrement ferritique, et reste stable même aux basses températures. L'aspect au microscope est celui de la micrographie III-16 : la ferrite se présente sous forme de grains polyédriques juxtaposés dans lesquels sont dispersées des inclusions (oxydes sulfures, etc.) provenant de l'élaboration.

Alliage B. — Les premiers cristaux solides, qui sont de l'austénite, apparaissent vers 1 480 °C. Entre 1 470 °C et 1 380 °C la proportion de liquide augmente ; à cette dernière température, la solidification est terminée, et l'échantillon est entièrement austénitique ; à 723 °C, l'austénite se transforme en un mélange de ferrite et de cémentite selon la réaction : sol. $\gamma \rightarrow$ sol. $\alpha + Fe_3C$. L'aspect micrographique en est très particulier ; en effet, la cémentite se forme par germination et croissance, et la ferrite apparaît par appauvrissement des régions voisines. La croissance se fait selon des directions cristallographiques déterminées et les deux phases apparaissent sous forme de plaquettes alternées. Cette configuration particulière donne un aspect irisé à l'échantillon lorsqu'il est examiné à l'œil nu (d'où le nom de *perlite* donné à ce constituant métallographique).

Alliage C. — Cet alliage est intermédiaire entre l'alliage ferritique et l'alliage eutectoïde, et est dit *hypoeutectoïde*. Les premiers cristaux solides ferritiques apparaissent vers 1 510 °C ; à 1 493 °C, la nature des phases change selon la réaction suivante :

$$\text{sol. } \alpha + \text{liq B} + \text{liq B en excès} \rightarrow \text{sol. } \gamma + \text{liq B}$$

Vers 1 420 °C, la dernière goutte de liquide disparaît et l'échantillon est entièrement austénitique. Vers 850 °C, des grains de ferrite proeutectoïde apparaissent et se développent ; l'austénite résiduelle s'enrichit en carbone. À 723 °C, on a en équilibre de la ferrite proeutectoïde et de l'austénite dont la concentration atteint 0,85 % de carbone. En franchissant l'isotherme eutectoïde (PS), cette austénite va donner naissance à de la perlite. Dans ce cas, on aura donc une structure particulière où des grains de ferrite polyédriques présenteront des plages de perlite localisées le long de leurs joints.

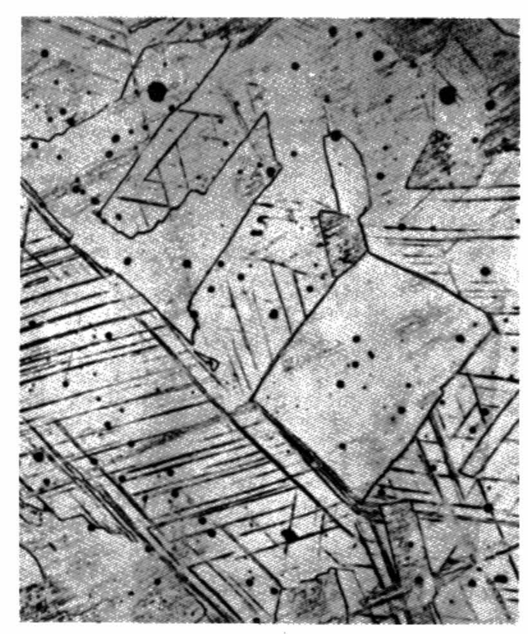


Fig. III-19 — Alliage D ; attaque électrolytique ; austénite ; (X 250) (*Centre technique des industries de la fonderie*)

Alliage D. — La température du point de début de solidification est abaissée notablement et l'intervalle de solidification augmente. Les premiers cristaux sont austénitiques et lorsque la solidification est terminée, il n'existe que de l'austénite. Lorsque la température s'abaisse au-dessous de celle qui correspond à l'intersection de la courbe SE avec la droite figurative de l'alliage, de la cémentite proeutectoïde apparaît. À mesure que la température s'abaisse la quantité de cémentite s'accroît, et l'austénite résiduelle s'appauvrit en carbone. À 723 °C, l'austénite restante se transforme en perlite, et, sur l'échantillon, on peut observer un réseau de cémentite emprisonnant des grains de perlite.

Pour les fontes qui sont des alliages fer-carbone contenant plus de 2 % de carbone, si la concentration en silicium est faible, c'est encore le diagramme métastable qui régit les équilibres. Ainsi, pour un alliage hypoeutectique, il apparaît d'abord de l'austénite proeutectique ; à 1 130 °C, la réaction suivante se produit : liq. + sol. $\gamma \rightarrow$ sol. $\gamma + Fe_3C$, avec un excès d'austénite. À cette température, apparaît l'eutectique austénite-cémentite appelé *lébédurite*. À 723 °C, l'austénite résiduelle se transforme en perlite. À température ambiante, on observe la perlite provenant de l'austénite initiale, de l'austénite eutectique et de l'austénite proeutectoïde mélangée à la cémentite eutectique et à la cémentite proeutectoïde. Dans le cas d'une fonte hypereutectique, la quantité de cémentite est plus grande.

Si la concentration en silicium est suffisante, la cémentite proeutectoïde et proeutectique n'est pas stable, et le carbone est réparti dans la matrice à l'état libre. La matrice est généralement perlitique, quelquefois avec présence de cémentite primaire non dissociée ; parfois elle est entièrement ferritique lorsque la totalité de la cémentite, y compris celle de la perlite, s'est dissociée. Le carbone est réparti dans la matrice sous forme d'écaille dont l'aspect et la distribution sont fonction des conditions de formation.

L'observation des structures s'effectue au moyen d'un microscope à platine inversée, appelé banc métallographique, après polissage et attaque selon les méthodes décrites au chapitre 1, § 4.1.2.

1.2.2. Les états hors d'équilibre. — Lorsqu'un alliage présente un point de transformation à l'état solide, par un traitement thermique convenable, on peut obtenir un état hors d'équilibre auquel correspond des structures et des propriétés différentes. Ces traitements thermiques ont une importance particulière pour les alliages fer-carbone et notamment dans le cas des aciers.

1° *La trempe.* — L'opération de trempe consiste à chauffer l'échantillon à une température suffisante afin d'obtenir une structure austénitique, puis à le refroidir brutalement. Le point correspondant à la transformation austénitique est fréquemment appelé *point* Ac_3. Si l'on considère la température des transformations en fonction du temps, on constate qu'au chauffage, cette transformation est indépendante de la vitesse de montée en température. Au refroidissement, si la vitesse de refroidissement est très faible, la transformation se produit à la même température qu'au chauffage, en revanche si la vitesse de refroidissement augmente la transformation se produit à une température inférieure (*point* Ar_1). Cependant, la décomposition reste du type perlitique ; la structure est très affinée. L'abaissement de la température de la transformation est fonction de la vitesse de trempe. Pour une vitesse suffisante, la structure n'est plus résoluble au microscope optique, et les agrégats provenant de la décomposition de l'austénite prennent le nom de *troostite* (la séparation de la ferrite et de la cémentite peut s'effectuer au microscope électronique).

Lorsque la vitesse de refroidissement devient grande, une seconde transformation se produit : c'est la transformation martensitique (*point* Ar_2). Elle ne correspond plus à une décomposition de l'austénite. En effet, la formation de la perlite ou de la troostite s'opérant par germination et croissance, il est donc nécessaire que les atomes de carbone diffusent, et par conséquent, que l'alliage reste un temps suffisant (même très bref) à une température assez

élevée pour que le phénomène se produise. Dans le cas de la transformation martensitique, le carbone reste en solution, et la transformation correspond simplement à un changement du réseau cristallin. Pour des vitesses de refroidissement moyennes, l'austénite peut se décomposer légèrement avant d'atteindre la température de début de transformation martensitique (pour des alliages fer-carbone, la transformation martensitique commence à + 260 °C, et l'austénite est intégralement transformée à — 160 °C. Ces valeurs sont cependant fonctions inverses de la teneur en carbone). C'est pour cette raison que les deux transformations peuvent coexister dans un certain domaine de vitesses. Lorsque la vitesse de refroidissement est telle que l'austénite parvient intacte à la température de début de transformation, seule la martensite apparaît; cette vitesse est dite *vitesse critique de trempe* (fig. III-20 et III-21).

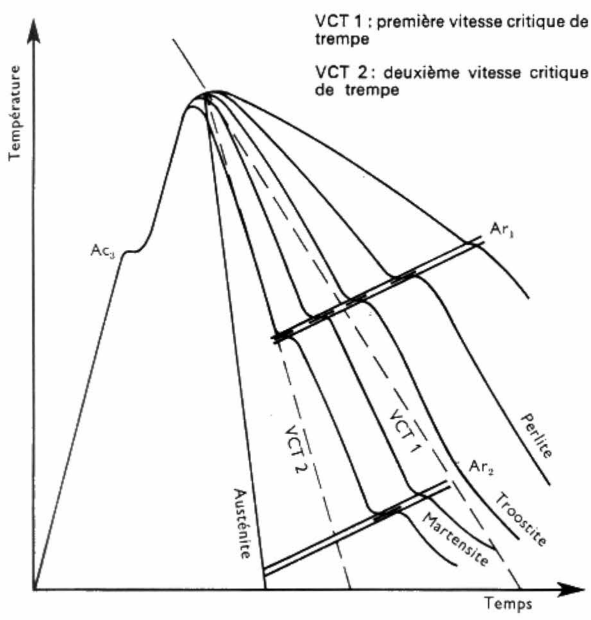


Fig. III-20 — Position des points de transformation au refroidissement de plus en plus grandes de la droite vers la gauche du graphique

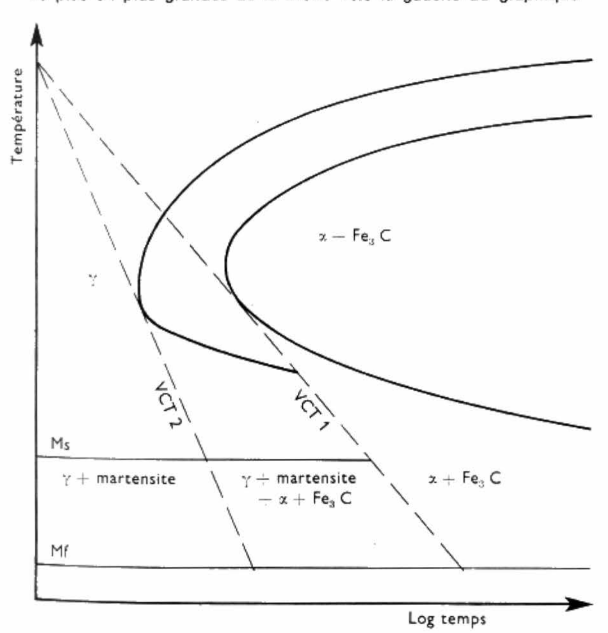


Fig. III-21 — Diagramme de refroidissement continu

La proportion de martensite et d'austénite résiduelle est fonction de la température la plus basse atteinte lors de la trempe. L'étude isotherme de la transformation permet de construire les courbes appelées T.T.T. (transformation, température, temps) ou courbes isoausténitiques qui donnent la quantité d'austénite décomposée pour un séjour déterminé à une température donnée, et la quantité de martensite obtenue à une température déterminée à partir de la fraction d'austénite atteignant la température de début de transformation martensitique. La martensite est une phase hors d'équilibre où les atomes de carbone en insertion distordent le réseau cubique du fer α qui devient légèrement tétragonal. Elle apparaît en plaquettes dans certains plans réticulaires de l'austénite.

Les tensions du réseau, que ce type de transformation crée, donnent une dureté exceptionnelle à cette phase (900 vickers), mais également une grande fragilité. Son aspect micrographique est caractéristique : elle apparaît sous forme d'aiguilles dispersées dans l'austénite résiduelle si la transformation n'est pas complète (fig. III-22), ou sous forme d'un enchevêtrement, si la transformation est totale. De plus, on doit noter que la dureté de la martensite est d'autant plus grande que la teneur en carbone est importante.



Fig. III-22 — Martensite (X 1000)
(*Centre technique des industries de la fonderie*)

La trempe d'une pièce pose des problèmes pratiques; en effet, la vitesse de refroidissement décroît de la périphérie au centre de la pièce, et la vitesse critique de trempe n'est plus atteinte à partir d'une certaine profondeur, il existe donc un diamètre critique qu'il ne faut pas dépasser si l'on veut obtenir une trempe à cœur. Ce diamètre est variable suivant la composition chimique de l'acier, la grosseur du grain et les conditions de trempe.

Ces différences de température entraînent des variations de volume des différentes couches de la pièce; de plus, les inégalités de température et de vitesse de refroidissement modifient l'époque et l'importance de la transformation martensitique (accompagnée toujours d'une augmentation de volume). Ces différentes causes expliquent les tensions internes considérables qui peuvent provoquer la déformation et même la rupture de la pièce traitée. L'utilisation de divers liquides de trempe (eau, huile, bain de sels, plomb fondu) permet de choisir une vitesse de refroidissement et un gradient de température de la surface au cœur de la pièce compatibles avec la nature de l'acier utilisé, les dimensions de la pièce, la profondeur de trempe et la structure recherchée.

2° *Le revenu.* — C'est un chauffage au-dessous de la température de formation de l'austénite; on le fait subir aux aciers trempés avant utilisation. À basse température (150 °C), le revenu élimine les tensions dues à la trempe en conservant la martensite et ses propriétés. Cependant, la martensite est fragile et il est quelquefois nécessaire d'effectuer un traitement thermique à une température supérieure afin d'obtenir de nouveaux constituants.



Fig. III-23 — Sorbite (X 1 000)
(*Centre technique des industries de la fonderie*)

Au-dessus de 400 °C, il y a précipitation de carbure. La structure obtenue est extrêmement fine ; elle est analogue à une troostite et est appelée *sorbite* (fig. III-23).

Dans chacun de ces traitements, la dureté et la limite élastique de l'acier diminuent mais la résilience augmente et l'on peut, suivant le temps et la température de traitement, obtenir l'association de propriétés désirée.

Dans le cas d'acier contenant de faibles quantités de chrome ou de nickel, on constate l'apparition d'une zone de température de revenu critique située entre 450 °C et 550 °C. Les aciers revenus dans ce domaine de température, et refroidis lentement, présentent une fragilité particulière à froid appelée *maladie de Krupp*. Ce défaut résulte de la précipitation d'un constituant fragile (nitrures) aux joints de grains. L'addition de molybdène permet d'éviter cette fragilité de revenu.

Dans un domaine thermique s'étendant de 500 °C à 800 °C, le revenu des aciers inoxydables provoque la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains ; l'appauvrissement en chrome des régions voisines fait perdre à l'acier sa passivité dans ces régions. Ce phénomène est à l'origine d'une corrosion intergranulaire particulièrement grave. On remédie à cette susceptibilité soit en diminuant la teneur en carbone de l'acier, soit en effectuant certaines additions qui stabilisent l'acier (Ti, Nb).

3° *Les traitements isothermes*. — Les opérations de trempe et de revenu peuvent être combinées pour donner directement la structure recherchée. Ce procédé est une application directe des principes retenus lors de l'établissement des courbes isoausténitiques (T.T.T.). Pour des températures comprises entre 500 °C et 200 °C environ, on constate l'apparition d'un nouveau constituant, la *bainite*, qui est un agrégat de ferrite et de cémentite spéciale.

Les traitements sont exécutés dans des bains de plomb ou de sels fondus. L'échantillon est refroidi rapidement dans le bain à température convenable puis maintenu un temps suffisant (donné par les courbes isoausténitiques : fig. III-24) afin que la transformation, ou la décomposition, de l'austénite se produise donnant la structure recherchée.

Ainsi si la température du bain de trempe est :

- 700 °C à 600 °C, on obtient de la *perlite*, fine à basse température, grossière à température élevée (la perlite peut éventuellement coalescer) ;
- 600 °C à 450 °C, on obtient de la *troostite;*
- 450 °C à 250 °C, on obtient de la *bainite* présentant un aspect aiguillé, agrégat de ferrite et d'un carbure mal défini (fig. III-25) ;
- 320 °C et au-dessous, on obtient de la *martensite* en quantité variable.

Cette façon de procéder permet de diminuer les tensions de trempe, d'éviter les déformations des pièces et d'obtenir de

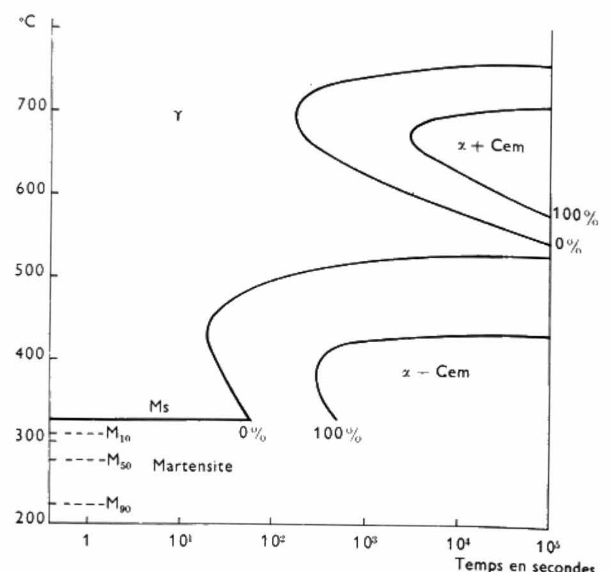


Fig. III-24 — Courbes T.T.T. ou isoausténitique pour un acier 44 CD 5
Ms : apparition de la martensite ; M_{10} : 10 % de martensite de formée ; M_{50} : 50 % de martensite de formée ; M_{90} : 90 % de martensite de formée.
Le point Mf (transformation totale) ne figure pas sur le graphique

nouveaux constituants (bainite) dont les caractéristiques sont intermédiaires entre celles de la troostite fine et celles de l'austéno-martensite.

4° *Les traitements thermochimiques*. — Pour certaines applications, il est nécessaire de durcir superficiellement certaines pièces, notamment celles soumises à l'usure, sans pour autant abaisser leur résilience.

Lors des traitements thermochimiques, la composition chimique de l'acier varie de la surface au cœur de l'échantillon. Le plus connu de ces traitements est la cémentation.

Pour obtenir ce résultat, on chauffe une pièce en acier à faible teneur en carbone, dans la zone de température où l'austénite est stable et cela en présence d'un milieu carboné. Ainsi le carbone diffuse et lorsque sa concentration est suffisante sur une épaisseur voisine d'un dixième à quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, la pièce est trempée. La transformation martensitique ne se produit qu'en surface. Un revenu convenable confère à cette surface la structure recherchée. La cémentation peut être effectuée soit en milieu solide (cément de Caron contenant 60 % de charbon de bois et 40 % de CO_3Ba), soit en milieu liquide (bain de carbonates alcalins fondus), soit en milieu gazeux (CO, CH_4, hydrocarbures, gaz d'éclairage). Lorsque l'on désire des qualités à cœur particulières, il est possible de cémenter des aciers contenant certains éléments d'alliage.

Il est possible d'obtenir des duretés superficielles très grandes (1 000 vickers) par carbonitruration. Dans ce

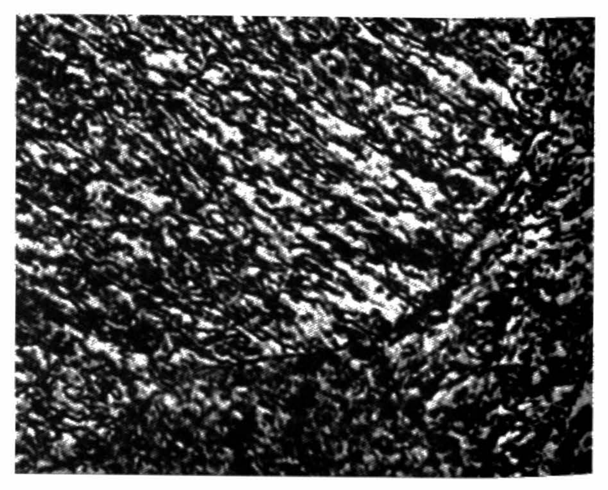


Fig. III-25 — Bainite (X 1 000)
(*Centre technique des industries de la fonderie*)

procédé, on fait diffuser simultanément du carbone et de l'azote. On obtient le milieu cémentant soit en ajoutant de l'ammoniac dans le gaz de cémentation, soit en ajoutant des cyanures (ions CN^-) aux bains de sels.

1.2.3. Les alliages spéciaux. — Afin d'améliorer les qualités des alliages fer-carbone, et notamment, de pouvoir leur faire subir la trempe isotherme, certains éléments spéciaux peuvent être ajoutés.

1° *Fontes.* — Les fontes peuvent contenir certains éléments d'alliage qui en modifient les propriétés ; ces fontes sont susceptibles de subir des traitements thermiques. Les matrices peuvent être perlitiques, bainitiques, martensitiques ou austénitiques. Le tableau suivant donne la nature des additions les plus courantes, leur influence sur les propriétés et les applications.

Fontes spéciales et complexes

Éléments ajoutés	Action	Utilisation
Al	Désoxydant - Contrarie les trempes primaires et secondaires - Améliore la tenue à l'oxydation à chaud - Graphitisant	Pièces destinées aux chaudières
Cr	Améliore la tenue à l'usure, à l'oxydation à chaud et à la corrosion - Antigraphitisant	Moyeux, pièces de chaudière
Mn	Favorise la trempe primaire et secondaire, et améliore les qualités	
Mg	Favorise la formation de graphite sphéroïdal - Graphitisant	Construction mécanique
Mo	Favorise la trempe primaire et secondaire - Antigraphitisant - Affine la structure	Matrice de forgeage
Ni	Favorise la trempe secondaire - Améliore la finesse de la structure, les propriétés à haute température et la tenue à la corrosion - Graphitisant	Construction mécanique
Va	Favorise la trempe primaire et secondaire - Améliore les qualités mécaniques	Construction mécanique
W	Favorise la trempe primaire et secondaire - Augmente le caractère réfractaire	Matériel thermique
Cr, Mo	Le chrome forme des carbures - Le molybdène affine le graphite et favorise la trempe	Vilebrequins, arbres à came
Ni, Cr, Mo	*Grises perlitiques.* — Même action que dans le cas précédent, le nickel entrave la formation de carbures	Blocs cylindres, matrices d'emboutissage de carrosserie
	Grises martensitiques. — Très grande dureté	Appareils de broyage, cylindres de laminoirs

Fontes spéciales et complexes (suite)

Éléments ajoutés	Action	Utilisation
Ni, Cr, Mo	*Grises austénitiques.* — Tenue aux températures élevées et à la corrosion	Génie chimique
	Blanches. — Plus dures et moins fragiles que les fontes blanches ordinaires	Cylindres de laminoir, pièces de broyeur
Ni, Mo	L'effet graphitisant du nickel l'emporte sur l'action du molybdène favorisant la trempe primaire	Arbres, vilebrequins, pièces de frottement
Ni, Cr, Mn	Améliore la trempe secondaire - Augmente la résistivité électrique - Rend la fonte paramagnétique	Construction électrique
Cr, Ti	Le chrome favorise la trempe primaire - Le titane affine le graphite	Lingotières d'aciérie
Cr, Al, Mo	Améliore la nitruration	Cylindres de moteurs

2° *Les aciers alliés et spéciaux.* — Les aciers contiennent très souvent des éléments d'alliage afin d'améliorer leurs qualités ; l'amélioration peut intéresser leurs propriétés mécaniques, leur aptitude à la trempe, leurs propriétés chimiques (inoxydabilité). Une très grande variété de nuances existe. Le tableau (V. page suivante) indique l'action générale des éléments d'addition.

3° *Les aciers inoxydables.* — Une catégorie particulièrement importante des aciers est celle des aciers inoxydables. L'inoxydabilité est apportée par le chrome quand sa concentration dépasse 12,5 %. Des additions convenables apportent des caractéristiques différentes selon leur nature, et permettent leur application dans de nombreux cas. Un grave inconvénient des aciers inoxydables est leur susceptibilité à la corrosion intergranulaire s'ils sont recuits dans un domaine de température compris entre 550 et 800 °C. En effet, dans ce domaine de températures, on provoque la précipitation de carbures complexes de fer et de chrome ce qui entraîne la déchromisation des pourtours des grains et, de ce fait, une susceptibilité accrue à la corrosion dans ces régions. On remédie à cet inconvénient en utilisant des aciers à très faible teneur en carbone ($C < 0,02$ %), ou en ajoutant des éléments d'addition tels que le niobium ou le titane qui se combinent plus facilement que le chrome avec le carbone.

1.3. Désignation et propriétés générales des aciers

1.3.1. Normalisation. — La normalisation française (norme NF A-02-001) classe les aciers selon leur pureté et les éléments d'alliage qu'ils contiennent, et les désigne par un symbole composé de lettres et de chiffres.

Lorsque les aciers sont définis par leurs *caractéristiques mécaniques*, ils appartiennent à la *classe A*. Les nuances de la classe A sont données page 327.

Si les aciers sont définis par leur *composition chimique*, ils appartiennent à la *classe C* et sont désignés : par C pour les aciers non alliés de catégorie courante ; par X.C., pour les aciers fins non alliés répondant à des prescriptions spéciales.

Ce symbole est suivi d'un nombre correspondant à la concentration en carbone, multipliée par 100 et d'une lettre minuscule qui définit la pureté chimique en soufre et en phosphore.

	Vitesse critique de trempe	Ac_3 V. fig. III-20	Ar_3 V. fig. III-20	Action sur le carbone	Action chimique	Grain	Divers
Mn	Décroît	décroît Gammagène	Décroît	Stabilise les carbures	Désulfure, maladie de Krupp	Augmente le grossissement du grain	Favorise les tapures et la surchauffe. Augmente la dureté par écrouissage (acier Hatfield). Utilisé dans l'acier de soudure à faible teneur en carbone. Maintient les caractères mécaniques
Mo	Décroît	augmente Alphagène	Augmente	Carbure	Antidote à la maladie de Krupp; désulfure, augmente la résistance à la corrosion	Restreint le grossissement	Diffusé lentement dans le fer, augmente le revenu, améliore la tenue à chaud, active la cémentation, facilite les traitements isothermes, favorise la stabilité et diminue les tensions, améliore la tenue au fluage, remplace en partie le tungstène, favorise la solubilité de l'azote
Ni	Décroît	décroît Gammagène	Décroît	Graphitisant		Affine	Stabilise l'austénite, affine la martensite, augmente la pénétration de trempe, abaisse M_s et M_f (V. fig. III-24)
P					Favorise la maladie de Krupp, améliore la résistance à la corrosion aux faibles teneurs		Abaisse la température de fusion, augmente l'aptitude au moulage. Eutectique inusinable
Si	Augmente	augmente Alphagène	Augmente	Graphitisant	Désoxydant	Grossit	Augmente la fragilité de la martensite, évite l'oxydation de la fonte, augmente la résistivité, augmente les dimensions des domaines de Weiss, améliore la profondeur et la régularité de cémentation, accélère la décarburation, accroît la résistance et réduit la tendance aux tapures
S							Augmente la tendance à la retassure, rend le métal rouvrain (fragile à chaud), augmente la viscosité des fontes, favorise la fragmentation des copeaux des aciers de décolletage
Ti	Augmente	augmente Alphagène	Augmente	Carbure	Grande affinité pour l'azote, combat la précipitation de carbure dans les aciers inoxydables, augmente la résistance à l'oxydation à chaud	Affine	Réduit la dureté de la martensite, évite la trempe à l'air des aciers au chrome, s'oppose à la formation d'austénite à températures élevées, augmente la résistance au fluage
V		augmente Alphagène	Augmente	Carbure augmente la dureté des carbures de tungstène dans les aciers rapides	Désoxydant, dénitrurant	Affine	Diminue la susceptibilité à la surchauffe, permet la trempe structurale
W	Décroît	augmente Alphagène	Augmente	Carbures durs		Affine	Améliore la dureté au rouge et la résistance à chaud
Al	Augmente	Augmente	Augmente	Graphitisant	Désoxydant, forme des nitrures	Restreint le grossissement	Traitement thermochimique par l'aluminium, règle la pénétration de l'azote en nitruration, abaisse le module d'élasticité
B		Sans effet					Recule les «genoux» des courbes T.T.T.
Be		Alphagène					Trempe structurale
Cu		décroît Gammagène		Graphitisant			Améliore la résistance à la corrosion par le soufre
Cr	Décroît	Alphagène augmente la fermeture du domaine γ à partir de 13 %	Décroît	Carbure difficile à mettre en solution, précipite au revenu	Améliore la tenue à la corrosion, favorise la maladie de Krupp	Augmente le grossissement	Tendance aux tapures, abaisse la teneur en carbone de l'eutectoïde, blanchit la fonte, élève la température de revenu (diffusion lente dans le fer) augmente la caractéristique mécanique à haute température; chromisation.
Co		Augmente et décroît		Carbure : la dureté augmente, la solubilité augmente		Restreint le grossissement	Stabilise et durcit l'austénite, améliore la dureté au rouge et la résistance au fluage, déplace les courbes T.T.T. vers la gauche, aimant
Mg				Sphéroïdisant graphite blanchit	Désoxydant		Blanchit la fonte

Nuances de la classe A

	Charge de rupture *R* (en decanewtons par millimètre carré)	
	minimum	maximum
ADx	33	50
A33	33	40
A37	37	44
A42	42	50
A48	48	56
A56	56	65
A65	65	75
A75	75	86
A85	85	95
A95	95	105

Indices de pureté

Indice de pureté	Teneur maximale en soufre %	Teneur maximale en phosphore %	Teneur maximale en soufre et en phosphore %
a	0,065	0,09	0,14
b	0,06	0,08	0,12
c	0,05	0,06	0,10
d	0,05	0,05	0,09
e	0,04	0,04	0,07
f	0,035	0,04	0,065
g	0,035	0,025	0,060

Ainsi, un acier indicé C 10 d est un acier ordinaire à 0,1 % de carbone, dont la teneur en soufre et en phosphore ne dépasse par 0,09 % ; un acier indicé XC 32 f est un acier fin à 0,32 % de carbone dont la teneur en soufre et en phosphore ne dépasse pas 0,065 %.

Dans la désignation des aciers alliés d'usages spéciaux, ce symbole C n'apparaît plus, et les éléments d'alliages sont désignés par une lettre conventionnelle : C = chrome ; D = molybdène ; K = cobalt ; M = manganèse ; N = nickel ; V = vanadium ; W = tungstène.

De plus, on distingue les aciers faiblement alliés dont la teneur en chaque élément d'addition ne dépasse pas 5 %. Les lettres sont rangées dans l'ordre des teneurs décroissantes, et en cas d'égalité par ordre alphabétique.

Les éléments suivants ne sont pas mentionnés : le manganèse et le silicium si la teneur est inférieure à 1 % ; le nickel si la teneur est inférieure à 0,5 % ; le chrome si la teneur est inférieure à 0,25 % ; le molybdène et le vanadium si la teneur est inférieure à 0,10 %.

Le symbole utilisé pour désigner un acier allié comprend : un premier groupe de chiffres donnant la concentration en carbone multipliée par 100 ; un groupe de lettres indiquant les éléments d'addition ; un groupe de chiffres donnant la concentration de l'élément principal, celle-ci est multipliée par 4 pour Cr, Co, Mn, Ni, Si, et par 10 pour Al, Mo, Ti, V. W.

Par exemple, l'acier 100 C 4 contient : C = 1 %, Cr = 1 % ; l'acier 20 N.C.D. 14 contient : C = 0,2 %, Ni = 3,5 %, Cr = 1 %, Mo = 0,3 %.

Pour les aciers fortement alliés, le symbole est précédé de la lettre Z et la teneur en élément prépondérant est alors donnée sans coefficient de multiplication. Par exemple, un acier Z 10 C 20 contient : C = 0,10 %, Cr = 20 %.

1.3.2. Propriétés et utilisation des aciers

Aciers au carbone destinés à la construction mécanique

Nuance	État de référence	Caractéristiques mécaniques (1)					
		E	*R*	*H*	*A* %	ε %	*K*
C 10 d	Recuit 900 °C	21	33 40	116	31	65	
C 20 d	Recuit 850 °C	26	42 50	112	25	52	
C 35 d	Recuit 850 °C	32	56 66	112	19	55	80
	Trempé 850 °C Revenu 500 °C	55	75			55	80
C 45 e	Recuit 825 °C	35	65 75	114	16	52	
XC 10 f	Recuit 900 °C	21	33 40	116	31	65	
	Double trempe 900 °C Double trempe 825 °C Sans revenu	30	45 65		20		220
XC 18 f	Recuit 850 °C	27	45 52	112		55	
	Trempé 875 °C Revenu 550 °C	50	70		15		120
XC 32 f	Recuit 850 °C	32	56 62	112			
	Trempé 825 °C Revenu 550 °C	58	75 90		12		100
XC 48 f	Recuit 850 °C	40	70 77	114			
	Trempé 825 °C Revenu 550 °C	65	85 100		9		50
XC 80 f	Recuit 820 °C	50	95 105		8		

Aciers spéciaux

Nuance	Éléments d'addition	État de référence	Caractéristiques mécaniques (1)						Usage
			E	*R*	*H*	*A*	ε	*K*	
30 UC 5	Cr 0,4 Cu 0,5 C 0,3	Trempé 900 °C Revenu 600 °C	77	90		12		70	Construction mécanique

(1) Voir note à la fin du tableau page 329

Aciers spéciaux (suite)

Nuance	Éléments d'addition	État de référence	Caractéristiques mécaniques (1)						Usage
			E	*R*	*H*	*A*	ε	*K*	
40 M 6	C 0,4 Si 0,1 Mn 1,5	Trempé 835 °C Revenu 700 °C	57	72		20		200	Construction soudée
10 S 6	Mn 0,7 Si 1,5 C 0,1	Trempé 870 °C Revenu 500 °C	135	145		8		50	Ressorts
	Pb 0,3 S 0,2	Recuit							Décolletage
40 N 14	C 0,40 Ni 3,5	Trempé 750 °C Revenu 675 °C	59	77				200	Pièces cémentées, arbres à came, vilebrequins, fusées, axes, galets, engrenages
15 N 28	C 0,15 Ni 7	Recuit 875 °C Trempé 825 °C	42 103	58 120		24 10		210 100	Pièces cémentées
30 N 20	C 0,3 Ni 5	Recuit Trempé 800 °C Revenu 600 °C	60 98	74 118		16 10		160 120	Utilisation directe pour pièces mécaniques
10 NC 12	C 0,1 Ni 3 Cr 0,7	Trempé 850 °C Revenu 500 °C	70	75		13		180	Construction mécanique
35 NCD 4	C 0,35 Ni 1 Cr 0,5 Mo 0,15	Trempé 850 °C Revenu 550 °C	110	125		11		90	Construction mécanique
32 CND 12	C 0,32 Cr 3 Ni 2,5 Mo 0,4	Trempé 950 °C Revenu 550 °C	125	150		11		70	Construction mécanique
Maraging	C 0,006 Mn 0,12 Si 0,17 Nb 0,54 Al 0,20 Ti 1,37 Ni 25,3	Trempé (air) 820 °C Revenu (4 h) 450 °C après traitement par froid	180	190		12		30	Construction aérospatiale
Z 2 C 25	C 0,02 Si 0,2 Mn 0,2 Cr 27	Trempé 800 °C	45	60	44	20			Acier réfractaire
Z 10 CN 18-8	C 0,1 Si 0,35 Mn 0,60 Cr 18 Ni 8	Trempé 1 150 °C	25	60	46	40		150	Acier réfractaire, pièces de four et surchauffeur
Invar	Ni 35 %								Bilame, tiges de pendules
Anibal	Ni 40 %								Compensation des balanciers de chronomètre
Platinite	Ni 46 %								Tubes électroniques
Permalloy	Ni 70 %								Blindage antimagnétique
Hatfield	C 1 Mn 12 à 14	Après écrouissage			500				Éléments de broyeurs, aiguillages (très bonne tenue à l'usure)
100 C 24	C 1 Cr 6	Recuit 850 °C Trempe huile 850 °C		100 250					Outils tranchants

(1) Voir note à la fin du tableau page 329

Aciers spéciaux (suite)

Nuance	Éléments d'addition	État de référence	Caractéristiques mécaniques (1)						Usage
			E	*R*	*H*	*A*	ε	*K*	
Z 10 C 14	C 0,1 Cr 14	Trempé 900 °C Revenu 400 °C	70	90	260	16		60	Chaudronnerie, coutellerie
Z 50 C 14	C 0,5 Cr 14	Trempé 975 °C Revenu 400 °C	135	170	480	4		20	Coutellerie, axes de pompes, soupapes, ailettes de turbines, matrices
Z 200 C 14	C 2 Cr 14	Trempé 1 000 °C Revenu 200 °C			RC 60				Matrices et filières
Z 10 C 30	C 0,1	Recuit	40	60		15			Pièces de fours, soupapes
Z 30 WCV 0903	N 0,9 Cr 0,3 C 0,3	Trempé 1 200 °C Revenu 650 °C	160	190		5		10	Poinçons et matrices pour formage à chaud

(1) *E* = Limite d'élasticité (daN/mm²) ; *R* = Résistance à la traction (daN/mm²) ; *H* = Dureté Brinell (daN/mm²) *A* = Allongement (%) ; ε = striction (%) ; *K* = résilience (J/cm²)

Aciers inoxydables

Nuance	Désignation normalisée	Composition	Traitement	Caractéristiques mécaniques (1)				Utilisation
				E	*R*	*A*	*K*	
Acier inoxydable martensitique	Z 8 C 13	C 0,08 Cr 13	Trempé 1 000 °C Revenu 600 °C	70	80	14	80	Industrie alimentaire
Acier ferritique	Z 10 C 16	C 0,1 Cr 16	Trempé 900 °C	55	60	25	130	Résistant bien à tous milieux oxydant, il est utilisé pour l'industrie de l'acide nitrique, l'orfèvrerie et l'industrie alimentaire
Acier austénitique stabilisé au titane	Z 10 CNT 18-08	C 0,1 Cr 18 Ni 0,8 Ti 0,5	Trempé 1 150 °C	25	60	40	150	Industries chimiques, alimentaires, papetières, dans la marine et en aéronautique

(1) Voir note à la fin du tableau précédent

2. MÉTALLURGIE DU CUIVRE

Le cuivre est un des métaux les plus anciennement connus. On pense qu'il était déjà utilisé sous forme native près de 8 000 ans avant J.-C. Après le fer, actuellement, c'est encore le métal le plus utilisé en tonnage.

2.1. Minerais de cuivre. — Le cuivre natif, presque pur, est assez rare (lac Supérieur, États-Unis d'Amérique; fig. III-26). Les minerais de cuivre sont très variés, mais les plus importants sont les sulfures (80 % de la production) :

— *la chalcopyrite* (Cu_2S, Fe_2S_3) est le plus répandu. Le gisement le plus important est celui de Rio Tinto;

— la *chalcosine* (Cu_2S) et la *covellite* (CuS) ne se trouvent pas en gisements importants;

— la *panabase*, sulfure double de cuivre et d'antimoine (Saxe) dont les gisements les plus importants se trouvent aux États-Unis d'Amérique, au Canada, en Rhodésie et au Congo Kinshasa.

On trouve également des minerais oxydés ou carbonatés :

— la *malachite* [$CuCO_3$, $Cu(OH)_2$] (Oural) et l'*azurite* [2 $CuCO_3$, $Cu(HO)_2$] (Congo Kinshasa). Ces minerais sont souvent très pauvres mais on les trouve en grande abondance;

— la *cuprite* (Cu_2O) (Oural, Chili).

Les teneurs en cuivre varient de 1 à 15 %; on considère que le minerai est riche si la teneur atteint 9 %. On y trouve généralement un peu d'or et d'argent (quelques grammes par tonne).

2.2. Traitements des minerais. — Les méthodes générales ont déjà été exposées (V. chap. 1). On se contentera de rappeler ici celles qui s'appliquent aux minerais de cuivre, et notamment aux minerais sulfurés, les minerais carbonatés ne subissant pas des traitements très différents des traitements théoriques.

Élaboration du cuivre. — *Traitements préalables.* — On procède d'abord à l'enrichissement du minerai par un broyage suivi d'un lavage pour éliminer les stériles et une partie des sulfures de fer.

1° *Métallurgie par voie sèche.*

Préparation d'un mixte sulfuré. — Le minerai enrichi est chauffé en atmosphère oxydante; on obtient un mélange relativement fusible débarrassé d'une grande partie du soufre. Les fours utilisés sont, soit des fours rotatifs à étages (Wedge), soit des fours réverbères.

Fusion pour matte. — On ajoute au mixte de la silice et du carbonate de chaux et, par chauffage au four réverbère, ou au water-jacket, vers 1 190 °C, on obtient une matte fusible titrant 39 à 40 % de cuivre (Cu_2S, $nFeS$).

Fig. III-26 — Mine de cuivre à ciel ouvert (*Diepedalle et Séaille — Centre d'information cuivre, laitons, alliages*)

Obtention du cuivre blister (fig. III-27). — Ce traitement se fait au convertisseur; par soufflage d'air on oxyde le sulfure de fer : $2\,FeS + 3\,O_2 \rightarrow 2\,FeO + 2\,SO_2$.

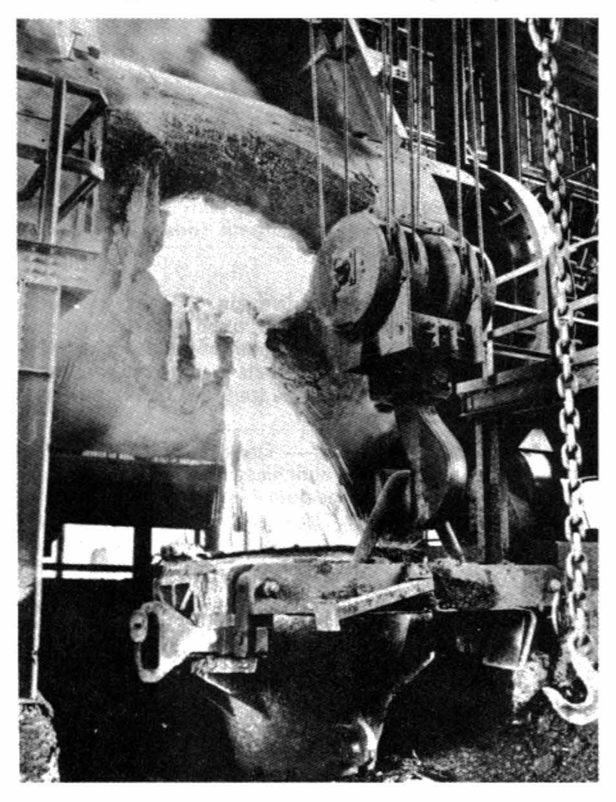
L'oxyde de fer passe dans les scories et la matte s'enrichit en cuivre (matte blanche). Le cuivre commence à s'oxyder :

$$2\,Cu_2S + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Cu_2O + 2\,SO_2$$

puis il se produit une réduction selon la réaction suivante :

$$2\,Cu_2O + Cu_2S \rightarrow SO_2 + 6\,Cu$$

Fig. III-27 — Coulée de cuivre blister (*ENAMI*)



Le cuivre se rassemble dans la partie inférieure du convertisseur, à l'abri de l'oxydation (tuyères latérales).

Le métal obtenu est poreux et impur (teneur en cuivre environ 99 %).

Raffinage. — On utilise deux procédés :

— Le raffinage par voie ignée se fait au four réverbère en deux temps. D'abord une *oxydation* permet la volatilisation de certains oxydes (Zn, As, Sb), ou leur passage dans le laitier (Fe, Ni, Co, Pb, Bi). Le cuivre obtenu contient alors un excès d'oxygène qui doit être réduit par *perchage* au bois vert (fig. III-28).

— Le raffinage électrolytique se fait dans de grands bacs remplis de sulfate de cuivre. On y dispose alternativement le cuivre impur coulé en plaques (anodes) et les tôles de cuivre laminé (cathodes). Le cuivre se dépose à la cathode; les principales impuretés (Zn, Fe, Pb, Sn) restent dans le bain et les métaux précieux (Au, Ag, Pt) se rassemblent dans les boues où ils sont récupérés. Après lavage et séchage les cathodes sont refondues et coulées en lingots (cuivre électrolytique et cuivre sans oxygène (fig. III-29).

2° *Métallurgie par voie humide.* — Cette méthode est en général utilisée pour les minerais pauvres (Rio Tinto, Chili). Le sel du métal est dissous par lavage du minerai naturel, ou après un grillage sulfatant au four Wedge.

Le lavage en tas : Comme solvant on utilise le sulfate ferrique qui se forme dans le minerai. Celui-ci est placé en tas bien aérés, et on l'arrose au moyen de la solution acide obtenue après précipitation du cuivre lors d'une opération précédente. Cette solution, riche en sulfate ferreux, s'oxyde en sulfate ferrique et s'enrichit avec celui formé dans le minerai même :

$$4\,FeS_2 + 15\,O_2 + 2\,OH_2 \rightarrow 2\,Fe_2\,(SO_4)_3 + 2\,H_2SO_4.$$

Cette solution attaque le sulfure de cuivre $S\,Cu_2$:

$$5\,Fe_2\,(SO_4)_3 + Cu_2\,S + 4\,H_2O \rightarrow 2\,CuSO_4 + 4\,H_2SO_4 + 10\,FeSO_4$$

La solution passe ensuite sur du minerai non aéré, et le sulfate ferrique restant est réduit en sulfate ferreux :

$$7\,Fe_2\,(SO_4)_3 + FeS_2 + 8\,H_2O \rightarrow 15\,FeSO_4 + 8\,H_2SO_4$$

Le lavage en cuve : Il se fait dans des cuves de 5 000 tonnes dans lesquelles de l'acide sulfurique (pour les minerais oxydés) ou du sulfate ferrique (pour les sulfures), circulent en marche ascendante en dissolvant le cuivre.

Quelques caractéristiques de métaux usuels

Métal	Symbole	Masse atomique	Masse volumique à 20 °C (grammes par centimètre cube)	Température de fusion (degrés Celsius)	Température d'ébullition (degrés Celsius)	Chaleur massique à 20 °C (joules par kilogramme degré Celsius)	Chaleur de fusion massique (103 J/kg)	Résistivité électrique (10^{-6} Ωm)	Coefficient de dilatation (10^{6} °C^{-1})	Conductivité thermique (watts par centimètre degré Celsius)	Coefficient de température de la résistivité (degrés Celsius à la puissance moins un)
Aluminium ..	Al	26,98	2,70	660	2 467	900	397	2,65	25	2,37	0,0039
Argent	Ag	107,87	10,50	962	2 212	238	111	1,59	19	4,27	0,0038
Cadmium ..	Cd	112,40	8,65	321	765	230	55,2	7,6	30	0,93	0,0038
Chrome	Cr	51,99	7,19	1 857	2 672	460	330	12,9	6	0,91	0,003
Cobalt	Co	58,93	8,9	1 495	2 870	418	276	9,8	12	0,69	0,0033
Cuivre	Cu	63,54	8,96	1 083	2 567	384	205	1,72	16,6	3,98	0,0039
Étain	Sn	118,69	5,75 (gris) 7,31 (blanc)	232	2 270	226	59	11,5	20	0,64	0,0042
Fer	Fe	55,84	7,87	1 535	2 750	452	272	10	12	0,803	0,005
Gadolinium .	Gd	157,25	7,89	1 311	3 233			140,5			0,0017
Magnésium .	Mg	24,31	1,74	649	1 090	1 015	368	4,6	25	1,59	0,004
Manganèse .	Mn	54,93	7,43	1 245	1 962	476	268	185 (de 23 à 100 °C)	22		
Molybdène .	Mo	95,94	10,22	2 617	4 612	250	288	5,7	5	1,4	0,004
Nickel	Ni	58,71	8,90	1 453	2 732	445	296	7,8	13	0,899	0,006
Or	Au	196,96	19,3	1 064	2 807	126	62,6	2,44	14,2	3,15	0,0034
Platine	Pt	195,09	21,45	1 772	3 827 (± 100)	127	100	22	0,73	0,043	0,0039
Plomb	Pb	207,19	11,35	327	1 740	126	23	10	29	0,346	0,003
Titane	Ti	47,90	4,54	1 660	3 287	523	418	42	8,5	0,2	
Tungstène ..	W	183,85	19,3	3 410	5 660	127	192	5,6	4,5	1,78	0,0045
Vanadium ..	V	50,94	6,11	1 890	3 380	485	410	24,8	8	0,60	
Zinc	Zn	65,37	7,14	420	907	390	112	5,8	35	1,15	0,0037

Parfois les chaleurs massiques sont encore exprimées en calories par gramme degré Celsius : (1 cal/g °C = 4180 J/kg °C) et les chaleurs massiques de fusion en calories par gramme (1 cal/g = 4180 J/kg).

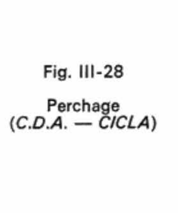


Fig. III-28

Perchage
(*C.D.A. — CICLA*)

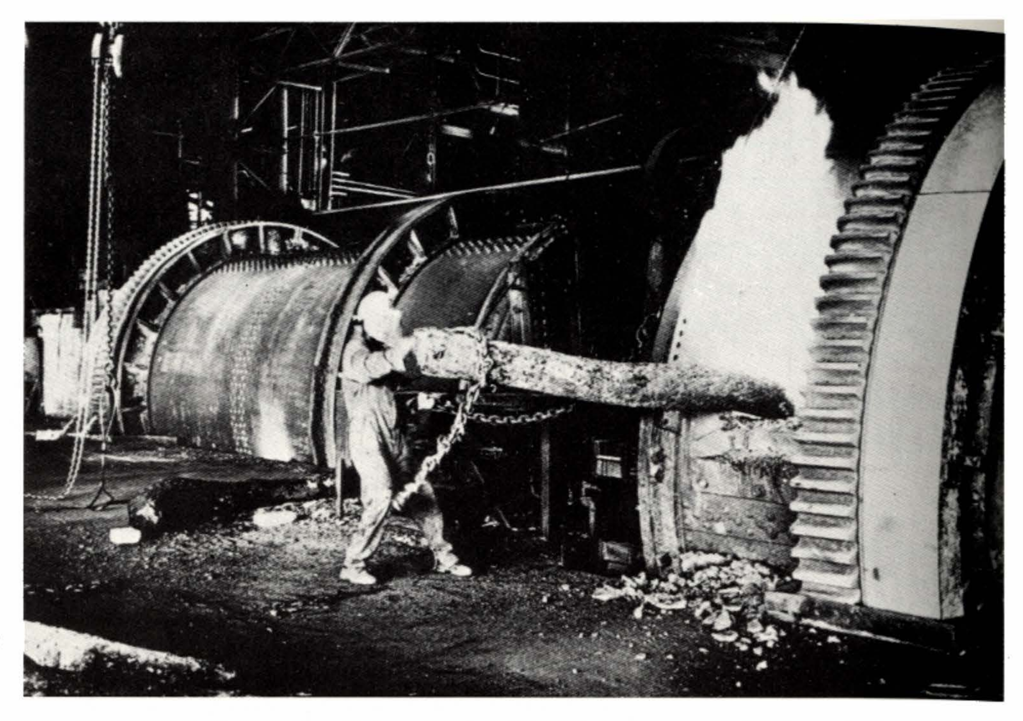


Fig. III-29

Affinage électrolytique du cuivre
(*Centre d'information cuivre, laitons, alliages*)

Extraction : Le cuivre est extrait de la solution de sulfate, soit par déplacement au moyen de fer selon la réaction : $CuSO_4 + Fe \rightarrow FeSO_4 + Cu$ qui donne un métal impur, soit par extraction électrolytique au moyen d'une anode insoluble (Pb, graphite, magnétite).

2.3. Utilisation du cuivre et de ses alliages

2.3.1. Métal pur. — Le cuivre est surtout utilisé sous forme de fils, de câbles et de barres par l'industrie électrique. Le bâtiment fait fréquemment appel aux tubes de cuivre pour les conduites d'eau (alimentation ou évacuation), et au cuivre en plaques pour les couvertures.

2.3.2. Alliages. — Les alliages les plus courants de l'industrie de transformation et de la fonderie sont rassemblés dans les tableaux ci-après ; les principaux d'entre eux sont : les laitons (cuivre-zinc), les bronzes (cuivre-étain), les maillechorts (cuivre-zinc-nickel) et les cupro-aluminiums.

— Les *laitons* forment une famille importante parmi les alliages de cuivre ; leurs propriétés mécaniques sont supérieures à celles du cuivre, et varient selon leur teneur en zinc. Cette famille comprend un certain nombre de sous-groupes :

- *le laiton 60.40* (UZ 40) ou laiton 2e titre contenant 40 % de zinc. Biphasé, il est peu malléable mais s'usine bien. On l'utilise en décolletage ou en filage à la presse ;
- *le laiton 67.33* (UZ 33) ou laiton 1er titre contenant 33 % de zinc. Monophasé, il est très malléable et résiste mieux à la corrosion que le précédent. On l'utilise pour l'emboutissage ;
- *le laiton 85.15* (UZ 15), ou tombac, utilisé pour la fabrication de raccords souples et étanches.

— Les *bronzes* qui sont connus depuis la plus haute Antiquité, forment une autre famille. Les propriétés varient considérablement selon la concentration en étain. Les bronzes ont également des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du cuivre ; leur température de fusion étant par ailleurs plus basse, ils se prêtent très bien à la coulée. On distingue :

- *le bronze* α qui contient de 5 à 13 % d'étain, est monophasé dans les conditions habituelles de refroidissement ; il est alors à l'état métastable. Sa malléabilité le fait choisir pour la frappe des médailles ;
- *le bronze à forte teneur en étain* qui est biphasé ; il contient un composé défini Cu_4Sn appelé phase δ, extrêmement dur, qui subsiste dans les conditions habituelles de refroidissement qui ne permettent d'obtenir que l'état métastable.

Avec des éléments d'addition complémentaires, ces alliages de base donnent une série très complexe d'alliages aux propriétés variées. Le tableau suivant résume les propriétés et l'utilisation des plus importants de ceux-ci.

Tableau I — Alliages de fonderie

Désignation de l'alliage	Norme correspondante	Éléments principaux (titres massiques ou pourcentages en masse)								Caractéristiques moyennes (1)				Utilisations
		Cu	Sn	Pb	Zn	Al	Fe	Ni	Mn	*R*	*E*	*A*	*H*	
U-E5		85	5	5	5					23	—	15	65	Robinetterie, petits coussinets
U-E7	AFNOR	84	7	4	5					24	—	17	70	Robinetterie courante
U-E10	A 53-707	88	10	1	1					27		20	80	Construction mécan. Robinetterie sous pression
U-E12		86	12	1	1					27	—	12	90	Pièces soumises à des
U-E14		86	14							22	—	2	100	frottements sans chocs
U-Pb8	AFNOR	80	10	10						18	10	10	70	Pièces de frottement
U-Pb15 E8	A 53-751	77	8	15						15	10	5	65	Coussinets matériel roulant
U-Pb20		75	5	20						15	8	5	60	Coussinets
U-Z35	AFNOR	63		2	35					20	10	20	60	Robinetterie
U-Z40	A 53-703	58		1	40	0,5				35	20	10	90	Robinetterie, pièces pour l'industrie électrique
U-Z23 A4	AIR 3370	65			23	5	2		3	50	30	12	160	Pièces mécaniques à
U-Z19 A6		65			20	6	3		5	75	50	8	230	haute résistance
U-A10	AFNOR	90				10				50	20	25	130	Industries chimique et
U-A10 Fe	A 53-709	87				10	3			60	25	15	170	mécanique. Robinetterie.
U-A10 N	AIR 3370	81				10	3	5	1	65	30	10	185	Hélices. Industrie chimique
—	—	Diff.						10-30		30-40	20	20	100	Résistance à la corrosion
UZN22	A 53-705	60			20			20		25	15	12	70	Industrie alimentaire. Architecture
Cu Électro	—									20	10	15	40	Industrie électrique
Cu-Cr	—	99	Cr = 1							35	25	20	100	Industrie électrique
U-Be	—	98	Be = 2							100	80	2	350	Moules pour plastiques, outils anti-étincelles

(1) *R* = Résistance à la traction (daN/mm²) ; *A* = Allongement (pourcentage) ; *E* = Limite d'élasticité (daN/mm²) ; *H* = Dureté Brinell (daN/mm²)

Tableau II — Alliages de transformation

Désignation de l'alliage	Norme correspondante	Éléments principaux (titres massiques ou % en masse)						État	Caractéristiques minimales (1)				Utilisations
		Cu	Zn	Pb	Sn	Al	Ni		*R*	*E*	*A*	*H*	
U-Z10		90	10					Recuit Dur	25 43	— —	40 10	— —	Décolletage Tôles et tubes
U-Z29 E1	AFNOR A 53-303 A 53-503	70	29		1			Revenu	32	—	35	—	Tubes de condenseurs marine
U-Z40	A 53-603	60	40					Recuit Dur	32 96	— —	45 6	— —	Barres pour forgeage et profilés
U-Z39 Pb2		59	39	2				1/4 dur	—	—	—	—	Décolletage
U-E7 P	AFNOR A 53-667	93			7			Recuit Dur	40 80	— —	50 —	— —	Fils
U-E9 P	AFNOR A 53-607	91			9			Recuit Ressort	40 80	— —	50 5	— —	Tôles, bandes, disques, flans
U-A6	AFNOR A 53-609	94				6		Recuit	40	—	—	—	Armement
U-A8		92				8		Dur	75	—	3	—	Usages décoratifs
U-Z28 N9	AFNOR A 53-605	63	28				9	Recuit	35	—	38	—	Orfèvrerie
U-Z45 N15	AFNOR A 53-305	40	45				15	Recuit 1/2 dur	38 45	— —	30 15	— —	Forgeage, profilés
U-N14 A		82				3	15	Corroyé	80	60	10	250	Usure
U-Be2		98	Be = 2					Corroyé	120	80	2	350	Tôles, barres, fils
Cu-Cr	—	99	Cr = 1					Trempé Durci	45	32	10	—	Machines à souder
U-Zr	—	99,9	Zr = 0,1					Trempé Revenu	45	36	12		Collecteurs électriques Conducteurs chargés

(1) *R* = Résistance à la traction (daN/mm^2) ; *A* = Allongement (pourcentage) ; *E* = Limite d'élasticité (daN/mm^2) ; *H* = Dureté Brinell (daN/mm^2).

3. MÉTALLURGIE DE L'ALUMINIUM

Découvert depuis un peu plus d'un siècle, (il fut isolé par Woelher en 1827) et fabriqué de façon véritablement industrielle depuis 1886, l'aluminium occupe cependant la troisième place des métaux industriels en tonnage.

3.1. Minerais. — L'alumine Al_2O_3 est contenue dans de nombreuses espèces minérales, les plus abondantes étant les feldspaths et les argiles.

Les seuls minerais industriels sont la cryolithe AlF_3, 3 NaF et les bauxites dont les types principaux sont :

	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
Les bauxites rouges	97-62 %	3-6 %	18-26 %
Les bauxites blanches	99-65 %	12-20 %	4-10 %

Seules les bauxites rouges sont utilisables car de hautes teneurs en silice rendent le minerai impropre à la fabrication de l'aluminium (perte d'alumine dans les insolubles).

3.2. Traitements des minerais. — Le procédé d'élaboration du métal comprend deux phases : le traitement de la bauxite pour purification de l'alumine et l'électrolyse ignée de l'alumine en solution dans la cryolithe fondue. Une troisième phase de superaffinage est éventuellement pratiquée (fig. III-30).

3.2.1. Purification de l'alumine. — Le procédé le plus utilisé est le procédé Bayer. La bauxite est d'abord concassée puis broyée ; après séchage, elle est attaquée en autoclave, sous pression, à 180-250 °C, par une liqueur de soude à 250-300 g/l :

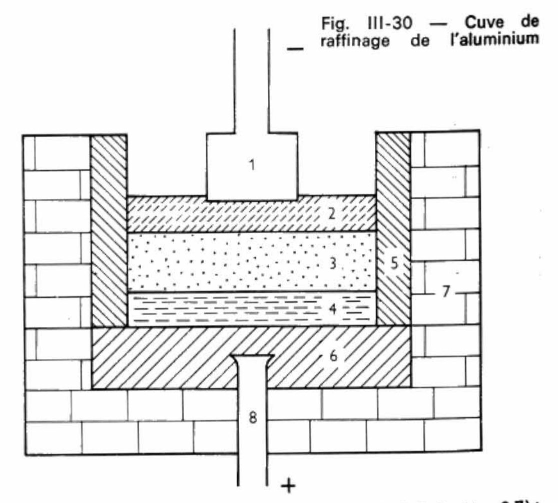
$$Al_2O_3,\ H_2O + 2\ NaOH \leftrightarrows Al_2O_3Na_2O + 2\ H_2O$$

La silice forme avec la soude et l'alumine un silicate double $SiO_2Al_2O_3Na_2O$ qui se retrouve avec Fe_2O_3 et TiO_2 dans les insolubles (boues rouges) qu'on élimine par décantation.

La solution d'aluminate $Al_2O_3Na_2O$ passe ensuite dans les décomposeurs (grands bacs dont la capacité peut atteindre 1 200 m³), où se produit la décomposition de l'aluminate en hydrate :

$$Al_2O_3Na_2O + 4\ H_2O \rightarrow Al_2O_3,\ 3\ H_2O + 2\ NaOH$$

Fig. III-30 — Cuve de raffinage de l'aluminium



1. Cathode de graphite ; 2. Aluminium raffiné (d = 2,3) ; 3. Bain (d = 2,7) ; 4. Anode fondue (d = 3) ; 5. Paroi en magnésie ; 6. Sole de carbone ; 7. Briquetage ; 8. Anode de graphite

Après filtrage et rinçage l'hydrate est calciné vers 1200 °C ; il est transformé en alumine α inerte et non hygroscopique.

3.2.2. Électrolyse de l'alumine. — Dans les cuves d'électrolyse, l'alumine est dissoute dans la cryolithe, fondue vers 950 °C. Le passage d'un courant électrique continu provoque une réaction qui libère l'aluminium :

$$2\ Al_2O_3 \rightarrow 4\ Al + 3\ O_2$$

L'aluminium se rassemble au fond de la cuve, et l'oxygène brûle les anodes ; la température est maintenue à sa valeur par effet Joule.

Les cuves, en général rectangulaires (fig. III-31), se composent d'un caisson en tôle garni de briques ou de ciment réfractaire. Le fond qui constitue la cathode est en

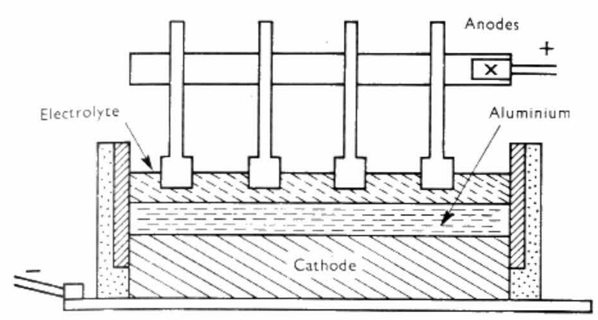


Fig. III-31 — Cuve d'électrolyse pour l'aluminium

blocs de carbone ; il est relié aux amenées de courant. Les anodes sont de deux types : anodes précuites en coke de pétrole pur ou électrodes continues Söderberg (carcasse d'aluminium remplie d'une pâte de charbon et de brai qui cuit pendant la descente de l'anode).

La pureté du métal à la sortie des cuves varie de 98 à 99,9 %.

Rendement : Pour obtenir 1 kg d'aluminium, il faut en moyenne : 4 kg bauxite soit 2 kg d'alumine, 1 kg de soude, 15 kWh, 1 kg d'électrode, 10 kg de carbone.

3.2.3. Superaffinage. — Ce procédé d'affinage électrolytique permet d'obtenir une pureté de 99,998 %. La cuve à électrolyse contient trois couches qui se séparent par différence de densité : la couche anodique constituée par l'aluminium à raffiner auquel on ajoute 33 % de cuivre, au fond ($d = 3$) ; le bain de raffinage, mélange de cryolithe et de chlorure de baryum ($d = 2,7$) ; l'aluminium pur qui remonte en surface ($d = 2,3$). La température est d'environ 750 °C (V. fig. III-30).

3.3. Utilisation de l'aluminium et de ses alliages

3.3.1. Métal pur. — Sa conductibilité électrique le fait employer en construction électrique ; sa conductibilité thermique et sa malléabilité en font un matériau de choix pour la fabrication de matériel ménager. Sa légèreté le fait utiliser en construction aéronautique.

3.3.2. Alliages. — Du fait des mauvaises caractéristiques mécaniques de l'aluminium pur, il est fréquemment allié avec le cuivre, le silicium, le magnésium et le zinc. La composition chimique et les caractéristiques des alliages les plus courants sont indiquées dans le tableau ci-après.

On distingue les alliages de fonderie utilisés pour la fabrication de pièces moulées et les alliages de transformation (forge, laminage, filage et étirage).

En fonderie, les moulages sont dits de première fusion si la coulée est faite à partir de lingots vendus par un fabricant d'aluminium ; ils sont de deuxième fusion si les lingots sont vendus par une affinerie.

L'aluminium et ses alliages sont généralement fondus dans des fours à creuset chauffés au fuel, au gaz ou à l'électricité.

Les procédés de moulage les plus utilisés sont le moulage au sable, le moulage en coquille et la coulée sous pression (V. t. 3, Fonderie).

À l'état liquide ces alliages s'oxydent rapidement et absorbent certains gaz (hydrogène, gaz de combustion, vapeur d'eau) qui se dégagent pendant la solidification ; il est donc indispensable d'éviter toute surchauffe et de traiter les bains avec des flux appropriés (flux de lavage, d'affinage, de désoxydation, etc.).

La plupart des alliages d'aluminium se prêtent bien aux différents procédés de corroyage.

Le forgeage, le laminage et le matriçage sont employés pour obtenir des pièces présentant de bonnes caractéristiques mécaniques. L'emboutissage est également largement utilisé de même que le filage et le chaudronnage.

Les différentes techniques de soudage peuvent être appliquées : le soudage oxy-acétylénique sous flux fluorés donne d'excellents résultats. Des procédés spéciaux ont été mis au point pour éliminer la formation d'alumine pendant le soudage (méthodes à l'arc électrique sous argon).

L'aluminium et ses alliages peuvent subir divers traitements de surface ; le polissage, l'anodisation et le chromage sont souvent utilisés.

Dans le domaine de la corrosion, l'aluminium a une excellente résistance à l'attaque atmosphérique grâce à la « peau » d'alumine qui le protège. Certains alliages (A-G) résistent très bien à la corrosion marine. La tenue à la corrosion des alliages moins résistants (AU4G) peut être améliorée par placage d'aluminium pur sur toutes les faces.

Certains alliages d'aluminium (A-U) sont susceptibles de durcissement par trempe et revenu (durcissement structural).

3.3.3. Tableaux des principaux alliages d'aluminium. — Nous résumons ci-après, dans les tableaux 1, 2, 3 et 4, la composition, les traitements et les propriétés des principaux alliages d'aluminium.

Ces tableaux sont extraits de la brochure : *Notions pratiques - Renseignements généraux sur l'Aluminium et ses alliages*, éditée par l'Aluminium Français.

Tableau 1 — Alliages de fonderie sans traitement thermique

Symbole	Nom commercial et composition	Mode de coulée	Charge de rupture (daN/mm²)	Limite élastique (0,2 %) (daN/mm²)	Allongement (pourcentage)	Dureté Brinell (daN/mm²)
A-U8	Aluminium-cuivre (à 8 % de Cu)	Sable Coquille	13-16 14-18	8-10 10-12	1-4 2-3	60-70 65-75
A-U12	Aluminium-cuivre (à 12 % de Cu)	Sable Coquille	15-18 15-20	10-12 12-14	0,5-2 0,5-2	70-80 70-85
A-G3	G3, Alumag 35 (Mg : 2,5 à 3,5 % Mn ⩽ 0,5 % ; Ti : 0,3 %)	Sable Coquille	16-20 18-22	6-8 6-8	8-12 10-15	40-50 60-65
A-G6	G6, Alumag 60 (Mg : 5 à 7 % ; Mn ⩽ 0,5 %)	Sable Coquille	16-20 22-26	10-13 10-12	2- 5 7-12	60-65 70-75

Alliages de fonderie sans traitement thermique (suite)

Symbole	Nom commercial et composition	Mode de coulée	Charge de rupture (daN/mm²)	Limite élastique (0.2 %) (daN/mm²)	Allongement (pourcentage)	Dureté Brinell (daN/mm²)
A-S4G	41 SM (Si : 3,5 à 4,5,% ; Mg : 0,45 à 0,8 % ; Mn : 0,5 à 0,9,%)	Sable Coquille	15-18 18-20	10-13 10-12	1-2,5 1-3	60-70 65-70
A-S13	Alpax (Si : 12,2 à 13,7 % ; Fe ⩽ 0,75 %)	Sable Coquille	18-20 18-22	7- 9 8-10	5-9 3-6	55-60 65-75
A-S20 U	Alliage hypersilicié (Si : 18 à 22 % ; Cu : 1 à 3 %)	Coquille	17-19	12-15	0,5	85-90

Tableau 2 — Alliages de fonderie susceptibles de durcissement par traitement thermique

Symbole	Nom commercial et composition	Mode de coulée	Traitement (températures en degrés Celsius)	Charge de rupture (daN/mm²)	Limite élastique (0,2 %) (daN/mm²)	Allongement (pourcentage)	Dureté Brinell (daN/mm²)
A-S10 G	Alpax H (Si : 10,25 % Mg : 0,26 % Mn : 0,5 %)	Sable Coquille	Trempé 540 °C, 4-6 h, et revenu 160 °C, 10 h Trempé 540 °C, 4-6 h, et revenu 160 °C, 10 h	25-28 27-32	18-21 19-21	1-3 1-2	90-90 85-100
A-U5 GT	APM, W41 (Cu : 4,6 % Mg : 0,28 % Ti : 0,25 % Si ⩽ 0,27 % Fe ⩽ 0,25 %)	Sable Coquille	Trempé 530 °C, 4 h et mûri Trempé 530 °C, 4 h et mûri	33-40 35-42	22-26 22-26	6-10 10-18	90-110 95-115
A-U4 N	Alliage Y (Cu : 4 % Mg : 1,5 % Ni : 2 %)	Sable Sable Coquille Coquille	Brut Trempé 520 °C, 3 h et mûri (ou revenu 175 °C, 6 h) Brut Trempé 520 °C, 3 h et mûri (ou revenu 175 °C, 6 h)	15-19 23-28 18-22 25-30	13-15 18-22 16-18 20-25	0,5-2 0,5-1,5 0,5-1,5 1-3	75-85 85-100 75- 85 95-105
A-S12 UN	Centrasil (Si : 12,8 % Mg : 1,2 % Ni : 1 % Cu : 1 %)	Coquille	Stabilisé 200 °C, 4 h	18-20	15-18	0,5-1	100-115
A-U10 G	Centralit (Cu : 10 % Fe : 1 % Mg : 0,3 %)	Coquille	Stabilisé 200 °C, 7 h	18-22		0,5-1	110-120

Tableau 3 — Alliages de forge et de laminage ne durcissant pas par traitement thermique

Symbole	Nom commercial et composition	État de l'alliage	Charge de rupture (daN/mm²)	Limite élastique (0,2 %) (daN/mm²)	Allongement (pourcentage)	Dureté Brinell (daN/mm²)
A-M	Aluminium-manganèse (Mn : 0,85 %)	Recuit Écroui	9-12 16-20	4- 6 14-18	32-38 5-3	25-30 55-60
A-G3	Duralinox H3, Alumag 35, Carbinox 3, Scléral 3 (Mg : 3 % ; Mn : 0,5 %)	Recuit Écroui	20-23 26-50	8-12 23-25	26-20 8-6	45-55 65-75
A-G5	Duralinox H5, Alumag 50, Carbinox 5, Scléral 5 (Mg : 5 % ; Mn : 0,5 %)	Recuit Écroui	30-32 35-40	14-18 30-35	26-20 10- 6	65-75 90-110
A-G7	Duralinox H7, Alumag 65, Carbinox 7, Scléral 7 (Mg : 7 % ; Mn : 0,5 %)	Recuit Écroui	32-36 40-45	16-20 35-40	26-20 10- 6	70- 80 100-120

Tableau 4 — Alliages de forge et de laminage susceptibles de durcissement par traitement thermique

Symbole	Nom commercial et composition	État de l'alliage	Charge de rupture (daN/mm²)	Limite élastique (0,2 %) (daN/mm²)	Allongement (pourcentage)	Dureté Brinell (daN/mm²)
A-SG	Almasilium, Inoxalium, Vival (Mg: 0,7,%; Si: 1,5 %)	Recuit Normal Dur	11-12 22-24 35-45	6- 7 12-14 30-40	30-28 20-16 12- 6	25- 30 60- 65 95-105
A-U4 G	Duralumin, Altérium, Avial, Carbium 10, Durcilium, Fortal (Cu: 4 %; Mn: 0,5 %; Mg: 0,5 %; Si: 0,6 %)	Recuit Normal	18-23 40-44	10-15 25-30	22-16 24-14	55- 60 100-110
A-U4 G1	Duralumin FR, Avial 15, Durcilium fort, Fortal E (Cu: 4 %; Mn: 1,2 %; Mg: 1,3 %; Si: 0,6 %)	Normal	44-48	30-35	18-12	110-120
A-U4 Pb	Duralumin D.E., Fortal D (Cu: 4,5 %; Mn: 0,6 %; Mg: 0,8 %; Pb: 1,5-2 %)	Normal	40-45	20-29	14	105-110
A-Z8 GU (1)	Zicral, T. 60 (Zn: 8 %; Mg: 2,5 %; Cu: 1,5 %; Cr: 0,25 %)	Laminé Recuit Laminé Normal Filé Recuit Filé Normal	20 55 21,5 60	10 45 12,5 55	19 10 14 6	 150-160 160-180

(1) Les caractéristiques indiquées pour l'alliage A-Z8 GU sont des minimums.

4. MÉTAUX DIVERS

4.1. Zinc

4.1.1. Minerais. — Le minerai le plus répandu est la blende ZnS qui renferme souvent de la galène (PbS) et du sulfure de cadmium CdS. On trouve également le zinc sous la forme de carbonate de zinc CO_3Zn (smithsonite), de silicates SiO_2, 2 ZnO (willemite) et d'un composé silicatocarbonaté (calamine).

Les gisements les plus plus importants se rencontrent aux États-Unis d'Amérique, au Mexique, au Canada, en Australie, en Allemagne (Silésie), en Italie, et en U.R.S.S. On exploite quelques mines en France (Massif Central, Pyrénées).

4.1.2. Traitement des minerais. — Quel que soit le minerai, celui-ci est préalablement transformé en oxyde par grillage ou calcination. Selon le cas, deux voies peuvent être utilisées.

1° *Voie sèche.* — La réduction de l'oxyde de zinc se fait par le carbone ou par l'oxyde de carbone: $ZnO + C \rightleftarrows Zn + CO$ ou $ZnO + CO \rightleftarrows Zn + CO_2$. L'équilibre est déplacé dans le sens favorable au-dessus de 1 100 °C. En fin d'opération, la température atteint 1 400 °C. Le point d'ébullition du zinc étant de 918 °C, le métal est évaporé et comme ses vapeurs s'oxydent facilement, on opère en vase clos. Les vapeurs de zinc se condensent ensuite dans des condenseurs placés dans la partie la moins chaude du four; les vapeurs qui peuvent encore subsister sont condensées dans les allonges situées à l'extérieur du four (fig. III-32).

L'opération dure environ 24 heures; la coulée est faite en plusieurs fois. Les impuretés sont essentiellement le cadmium et le plomb. L'oxyde de cadmium est réduit vers 760 °C; la température d'ébullition du cadmium étant de 765 °C, le métal est entraîné par les premières vapeurs de zinc. Le plomb qui ne bout que vers 1 500 °C est recueilli vers la fin de l'opération.

Le zinc peut être affiné par liquation, car il n'est pas miscible au plomb lorsqu'il est fondu; cette opération fournit le métal de qualité courante. Le métal pur s'obtient par distillation fractionnée.

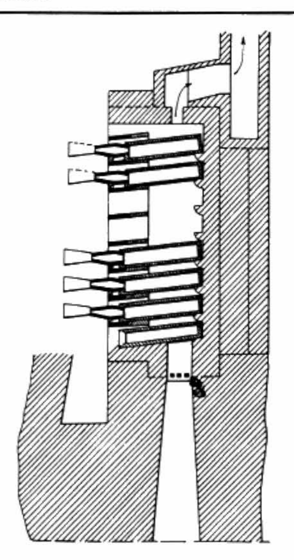


Fig. III-32

Four pour la réduction du zinc, les condenseurs placés dans la partie haute du four, se prolongent vers l'extérieur de celui-ci (gauche de la figure) par des allonges

2° *Voie humide.* — Le produit grillé est lessivé à chaud au moyen d'une solution aqueuse d'acide sulfurique à 20 %. La solution de sulfate de zinc $ZnSO_4$ est purifiée en fer par oxydation du sulfate ferreux Fe SO_4, et hydrolyse avec précipitation de l'hydrate ferrique; cela entraîne éventuellement l'arsenic et l'antimoine. Le cuivre et le cadmium sont précipités par du zinc pulvérisé.

La solution purifiée permet l'extraction par électrolyse avec anodes de plomb et cathode en aluminium.

4.1.3. Utilisation du zinc et de ses alliages. — À l'état pur, le zinc est utilisé en feuilles pour la couverture, les tuyauteries, et comme revêtement protecteur de l'acier (il est déposé soit par zincage, soit par galvanisation).

Les alliages principaux du zinc sont les laitons (V. ci-dessus § 2) et les zamacks qui sont des alliages zinc-aluminium-cuivre. Leur excellente aptitude au moulage les font utiliser pour la fabrication par fonderie de petites pièces accessoires; leur susceptibilité à la corrosion, bien qu'ayant été déjà grandement améliorée. en restreint l'usage.

4.2. Cadmium

4.2.1. Extraction. — Le cadmium est un sous-produit de la métallurgie du zinc ; il est extrait de la poudre de zinc oxydée qui s'est déposée en début de distillation lors de la réduction de ce métal. Le cadmium pur est obtenu par dissolution dans une solution aqueuse sulfurique et électrolyse.

4.2.2. Utilisation. — Le cadmium est utilisé à l'état pur pour effectuer des dépôts électrolytiques de protection ou des électrodes d'accumulateurs. Absorbant facilement les neutrons lents (grande section efficace), il est utilisé pour la fabrication de barres de contrôle de réacteurs nucléaires.
Les alliages cadmium-zinc, cadmium-étain, sont utilisés comme soudure. Le cadmium entre également dans la composition de certaines alliages antifriction.

4.3. Plomb

4.3.1. Minerais. — Les minerais exploités en vue de l'élaboration du métal sont la *galène* (sulfure de plomb PbS souvent argentifère), la *cérusite* (carbonate de plomb $Pb\,CO_3$) et l'*anglésite* (sulfate de plomb $PbSO_4$).
Les principaux pays producteurs de minerais sont les États-Unis d'Amérique, l'Australie, le Mexique et le Canada.

4.3.2. Traitement des minerais extraction du plomb. — Le traitement du minerai (galène) se fait en trois phases :

1° Le *grillage à mort* qui s'effectue au four réverbère ou dans des convertisseurs après addition de chaux et de gypse :

$$2\,PbS + 3\,O_2 \rightarrow 2\,SO_2 + 2\,PbO$$

2° La *réduction de l'oxyde*, afin d'obtenir le plomb brut (ou plomb d'œuvre) par traitement au four water-jacket en présence de chaux ou de silice.

3° Le *raffinage et la désargentation* pour lesquels, suivant la composition du plomb d'œuvre, plusieurs procédés sont utilisés : *dulcification* (liquation, oxydation et scorification successives) puis *désargentation* (par zincage, pattinsonage ou électrolyse). Des perfectionnements récents ont été apportés à ces méthodes (procédés Harris, Parkes, etc.).

4.3.3. Utilisation du plomb et de ses alliages. — Le plomb pur est utilisé pour la fabrication de couvertures, de tuyaux, d'électrodes d'accumulateurs et pour la protection contre les rayonnements ionisants (rayons γ).
Le plomb peut être allié à de nombreux métaux. Les mélanges de certains métaux blancs permettent d'obtenir des alliages dont les températures de fusion sont échelonnées jusqu'à celle du plomb (327 °C) ; ils sont utilisés dans l'industrie pour la fabrication d'éléments fusibles de sécurité (chaudières, avertisseurs d'incendie, électricité, etc.) :

Alliage	Pb %	Sn %	Bi %	Cd %	Température de fusion
Wood......	25	12,5	50	12,5	70 °C
Darcet.....	25	25	50	—	96 °C
Eutectique binaire.....	44,5	—	55,5	—	124 °C
Eutectique binaire.....	38	62	—	—	183 °C

Le plomb allié à l'antimoine sert à la fabrication des balles, et allié à l'arsenic, à celle du plomb de chasse. Les alliages Pb — Sb — Sn (50, 25, 25) sont utilisés pour les caractères d'imprimerie tandis que les alliages Pb — Cd (91 — 9) ou Pb — Sn — Cd (80 — 10 — 10) servent en soudure.

4.4. Nickel. — Le nickel, isolé en 1751, est un métal dont l'utilisation est récente ; en effet, son utilisation industrielle n'a vraiment commencé que vers 1880.

4.4.1. Minerais. — Il existe deux principaux minerais du nickel. La *garniérite* est un silicate double de nickel et de magnésium toujours associé à du fer et du cobalt ; la teneur en nickel est comprise entre 4 et 10 %, celle en cobalt est d'environ 0,3 % ; en revanche, le fer, relativement abondant, se trouve à une concentration variant de 6 à 16 %. Ce minerai se rencontre essentiellement en Nouvelle-Calédonie. Les *pyrites complexes* contiennent de 2 à 4% de nickel, 0,5 à 3 % de cuivre, 50 à 60 % de fer. On extrait des pyrites au Canada.

1° *Traitement du minerai calédonien.* — Après traitement préparatoire du minerai, celui-ci subit les opérations suivantes :

— *La fusion sulfurante pour matte :* Le minerai mélangé à de la silice est fondu au four water-jacket en présence de coke et de gypse (sulfate de calcium). Le sulfate de calcium est réduit en sulfure de calcium qui sulfure l'oxyde de nickel, et l'on obtient une matte NiS, nFeS contenant environ 50 % de nickel.

— *Le déferrage de la matte :* La matte est traitée au convertisseur où le fer est oxydé et scorifié par de la silice ajoutée :

$$2\,NiS, nFeS + 2\,nSiO_2 + 3\,nO_2 \rightarrow 2\,NiS + 2\,nFeSiO_3 + 2\,nSO_2$$

La scorie, riche en sulfure de nickel, est rajoutée comme fondant aux charges du water-jacket, le sulfure contenant 77 % de nickel est coulé en lingot.

— *Le grillage à mort :* La matte déferrée est grillée dans un four à réverbère, et donne de l'oxyde de nickel NiO.

— *La réduction de l'oxyde :* L'oxyde de nickel, finement broyé, est mélangé avec de la farine et comprimé en « pellets » qui sont placés avec du charbon de bois dans une cornue verticale à circulation continue. Chauffé vers 1 250 °C, le nickel est réduit et fritté.

2° *Traitement du minerai canadien.* — Après traitement et séparation de la fraction riche en cuivre et de celle riche en nickel, on procède aux opérations suivantes :

— *La fusion pour matte :* Après prétraitement dans des fours à soles circulaires multiples où certaines impuretés sont désulfurées et oxydées, le minerai est envoyé dans un four à réverbère où l'oxyde de fer est scorifié au moyen de silice. On obtient une matte : NiS, nCuS, pFeS.

— *Le déferrage de la matte :* La matte fondue est traitée par soufflage d'air dans des convertisseurs horizontaux, le fer restant est oxydé et scorifié. La matte déferrée contient 80 % de nickel et de cuivre et 20 % de soufre.

— *La séparation du cuivre :* Le sulfure impur est fondu en présence de sulfure de sodium Na_2S. Le sulfure de cuivre étant plus soluble dans le sulfure de sodium que le sulfure de nickel, on peut ainsi les séparer ; en répétant l'opération sur les parties enrichies en nickel (bottoms), on obtient finalement un produit contenant environ 74 % de nickel et 1,5 % de cuivre.

— *L'obtention du nickel :* Il est possible d'effectuer un grillage oxydant du sulfure épuré et à partir de ce matériau on peut utiliser deux voies. L'oxyde impur peut être réduit au moyen de charbon de bois : le métal obtenu sert à la confection d'anode et est épuré par voie électrolytique. L'oxyde peut aussi être réduit par du gaz à l'eau : le métal est attaqué à 80 °C par l'oxyde de carbone et il se forme du nickel trétracarbonyle :

$$Ni + 4\,CO \rightleftarrows Ni(CO)_4$$

Le nickel tétracarbonyle gazeux à la température de traitement est envoyé dans un décomposeur à 180 °C ; un nickel très pur se dépose tandis que l'oxyde de carbone est recyclé.

4.4.2. Utilisation du nickel et de ses alliages. — Le nickel pur est utilisé directement pour le nickelage électrolytique destiné essentiellement à la décoration. Il permet la fabrication de certains instruments de laboratoire, la confection d'électrodes d'accumulateurs (accumulateurs cadmium-nickel). Il entre dans la constitution de certaines pièces de monnaie.
Industriellement, ses alliages sont plus importants. Ajouté en faible quantité aux aciers, il en améliore certaines propriétés ; son utilisation pour la fabrication des aciers inoxydables austénitiques s'est considérablement

développée. Il sert également à la fabrication d'aciers résilients à très haute résistance (Maraging) utilisés en aéronautique et en astronautique. Le nickel, allié à 28 % de cuivre et quelques pour cent de fer, donne le métal monel (obtenu directement dans le cas des minerais canadiens) qui possède une bonne tenue à la corrosion, même à chaud, en présence de certains agents chimiques. Cet alliage est utilisé pour la fabrication d'appareillages de mine, pour l'industrie chimique ou pour la marine.

Les alliages nickel-chrome offrent une excellente tenue à l'oxydation à chaud ; les alliages les plus utilisés sont : Ni 80 — Cr 20 (fabrication de pièces de four) ; Ni 65 — Cr 15 — Fe 20 (fils de résistance de chauffage, appareillage chimique) ; Ni 88 — Cr 10 — W 2 (pyros pour étalons dilatométriques) ; Ni 80 — Cr 14 — Fe 6 ou Inconel (industries minières ou alimentaires) ; Ni 60 — Cr 12 — Fe 28 (A.T.G.) ou Ni 80 — Fe 5 — Cr Mo (Nimonic). Ces alliages destinés à supporter des températures élevées sont utilisés en aéronautique (réacteurs).

4.5. Métallurgie de l'étain. — L'étain allié au cuivre (bronze) est connu depuis la plus haute Antiquité ; il est connu comme métal depuis le début de notre ère.

4.5.1. Traitement des minerais

1° *Minerais.* — Le seul minerai important est la *cassitérite* SnO_2 (0,5 à 10 % d'étain) mélangée fréquemment à du tungstate de fer (Wolfram). On le trouve en Bolivie, en Chine, au Vietnam, dans les îles de la Sonde, en Cornouailles ; la France dispose de quelques petits gisements. Le minerai est enrichi par broyage, criblage et flottation.

2° *Élaboration.* — La méthode moderne d'élaboration (procédé d'Ugine) consiste à préparer des agglomérés de cassitérite — carbone — chaux — fondants. Cette préparation est réduite au four électrique qui permet d'obtenir de l'étain contenant un peu de fer et une scorie à 12 % d'étain et 25 % de fer. Celle-ci est reprise après addition de ferro-silicium, de coke et de chaux ; on obtient alors une scorie exempte d'étain, un ferro-silicium à 3 % d'étain et de l'étain pratiquement pur.

Ce métal est ensuite affiné par liquation puis perchage au bois vert qui oxyde les impuretés restantes.

4.5.2. Utilisation. — À l'état pur, l'étain est utilisé pour la formation de revêtement protecteur (étamage) et la fabrication de tuyaux.

En addition, ses alliages les plus importants sont les bronzes (alliages Sn — Cu, V. ci-dessus § 2) et certains alliages antifriction.

Comme élément majeur, il permet d'obtenir divers alliages : Sn 63 — Pb 37 (soudures) ; Sn 85 — Pb 15 (vaisselle) ; Sn 50 — Zn 50 (modèles de fonderie sans retrait) ; Sn 87 — Sb 10 — Cu 2 — Pb 1 (métal anglais pour vaisselle et objets d'art).

4.6. Métallurgie du magnésium. — Le magnésium est un métal ultra-léger (1,74 g/cm³) isolé par Bussy en 1829.

4.6.1. Traitement des minerais. — Les variétés de minerais sont assez nombreuses : *giobernite carbonate* $MgCO_3$ (Grèce, Tyrol, États-Unis d'Amérique) ; *dolomie* Co, $Mg(CO_3)_2$ (France, Corse, Italie) ; *carnalite* K, $MgCl_3$ (Italie, États-Unis d'Amérique), *saumures salines.*

Les saumures après chloration préalable, épuration par précipitation et cristallisation du chlorure de sodium et du chlorure de calcium, permettent d'obtenir du chlorure de magnésium hydraté $MgCl_2, 6\,H_2O$. Ce composé est obtenu à partir des minerais par une calcination qui donne l'oxyde Mg O, celui-ci étant transformé en $MgCl_2$ par action du chlore en présence de carbone. Le métal est extrait de son chlorure par électrolyse et affiné soit par courant gazeux (hélium, argon), soit par flux salins, soit par distillation (méthode Chaudron-Herenguel).

4.6.2. Utilisation. — Il n'existe pratiquement pas d'application du magnésium à l'état pur. Il est très utilisé comme élément d'addition dans les alliages d'aluminium (duralumin, AG). Comme élément majeur, on le rencontre dans les alliages suivants : Mg 98,5 — Mn 1,5 (moulage, profilés, chaudronnerie) ; Mg 90 — Al 10 (métal susceptible de prendre une trempe structurale : roues d'avions et de véhicules) ; Mg 94 — Zn 6 ou électron (pistons). Les autres alliages sont peu employés.

4.7. Métallurgie du béryllium. — Le béryllium est un métal ultra-léger (1,84 g/cm³), isolé en 1828 simultanément par Bussy et Wölher.

4.7.1. Traitement des minerais. — Le minerai de béryllium est essentiellement le *béryl* $6\,SiO_2, Al_2O_3, 3\,BeO$ qui contient 3,6 % de béryllium (le béryl teinté en vert par des oxydes métalliques donne l'émeraude). On le trouve en France, à Madagascar, en Inde, au Brésil.

Le minerai, après broyage, est attaqué par le silicofluorure de sodium pour donner un fluorure double de béryllium et de sodium ; l'action de l'acide fluosilicique additionné de silice permet d'obtenir du fluosilicate de soude et du fluorure de béryllium. Ce dernier composé, chauffé à 300 °C donne de l'oxyfluorure de béryllium $2\,BeO, 5\,BeF_2$ qui, additionné de fluorure de baryum fondant) est soumis à électrolyse ignée (1 400 °C).

4.7.2. Utilisation. — Le béryllium pur, étant donné sa très grande transparence aux rayonnements X et γ, est utilisé en feuilles comme fenêtres de compteurs de rayonnement ou de tubes générateurs de rayons X.

Étant donné qu'il absorbe peu les neutrons thermiques (lents), ce métal est utilisé comme modérateur, comme réflecteur et comme matériau de gainage dans les réacteurs nucléaires.

Utilisé comme constituant mineur d'alliages avec le cuivre ou le nickel, il permet d'obtenir un durcissement par trempe structurale, et sert à la fabrication d'outils antidéflagrants (mines, poudreries).

4.8. Métallurgie du titane. — Découvert par Gregor en 1791, ce métal n'a pu être obtenu pur par Hunter qu'en 1910. La fabrication industrielle, sous forme ductile, a été mise au point par Kroll (1948). Il a été peu utilisé jusqu'à une époque récente. Son haut point de fusion, sa faible masse volumique et sa grande résistance mécanique en font un matériau particulièrement adapté à l'aéronautique et à l'astronautique.

4.8.1. Minerais et traitement. — Les minerais sont l'*ilménite* ou titanate de fer TiO_3Fe que l'on rencontre mélangé d'hématite ou de magnétite (États-Unis d'Amérique, Norvège, Inde, U.R.S.S., Canada) et le *bioxyde de titane* Ti_2O_2 que l'on rencontre sous trois formes : le rutile, la brookite et l'anatase (Norvège, États-Unis d'Amérique).

L'élaboration par le procédé Kroll comporte les phases suivantes :

— un traitement du minerai à chaud par le chlore qui donne du tétrachlorure de titane $TiCl_4$, liquide qui est purifié par distillation fractionnée ;

— le tétrachlorure de titane est réduit à l'abri de l'air par le magnésium fondu à 800 °C dans une cornue appelée réacteur. L'éponge de titane obtenue est séparée du chlorure de magnésium en coulant celui-ci au fond du réacteur puis en le distillant à 900 °C sous vide ;

— le métal obtenu est broyé, déferré par tamisage (les particules fines étant plus riches en fer) puis fondu à l'arc sous atmosphère d'argon.

Le titane est très sensible à la présence d'impuretés : l'oxygène augmente sa dureté, le carbone (0,1 %) et l'hydrogène (0,015 %) augmentent sa fragilité, l'azote, le fer et le silicium modifient certaines de ses propriétés. Le raffinage permet d'abaisser le taux en impuretés mais les procédés sont complexes et ils conduisent à des prix de revient élevés.

4.8.2. Mise en œuvre du titane. — Compte tenu de son importance croissante, il paraît nécessaire de donner quelques indications sur la mise en œuvre du titane et de ses alliages, actuellement assez peu connue des praticiens qui ne sont pas spécialistes.

Produits de livraison, travail, usages du titane et de ses alliages

— *Produits de livraison :* Les demi-produits ou les produits élaborés à l'usine métallurgique sont obtenus par les opérations de transformation des lingots aux services des

forges, des laminoirs, de la tréfilerie (services analogues à ceux dont on a parlé en donnant le schéma d'une usine sidérurgique).

Le tableau ci-après indique la forme courante de ces produits.

Titane non allié et ses alliages	Formes courantes fournies par la Société Titanium
T-50 et T-60 ..	Produits forgés, tôles, bandes, barres laminées, tubes sans soudure et profilés.
T-C3 Fe.......	Produits forgés, tôles, barres laminées, tubes sans soudure et profilés.
T-A4M	Produits forgés, barres laminées, tubes sans soudure et profilés. Cet alliage, moins ductile que le précédent, n'est pas fourni à l'état de tôles.
T-A6V	Produits forgés, tôles.
T-A5E	Produits forgés, tôles (soudables dans une certaine mesure, mais aptitudes de soudabilité moindres qu'avec le titane non allié). Cet alliage est plutôt réservé aux cas où l'on a besoin d'avoir le maximum de résistance à chaud.

— *Travail à l'atelier :* Les opérations concernant le travail des métaux et des alliages, soit par formage direct soit par usinage (travail par outils coupants sur machines-outils) sont étudiées plus loin et le lecteur pourra s'y reporter.

Néanmoins, en ce qui concerne le titane et ses alliages, il faut noter les points suivants :

— *Opérations du formage.* — Le pouvoir émissif du titane étant grand, ce métal et ses alliages se refroidissent très vite ; il y a donc lieu de placer les fours de réchauffage à proximité des postes de travail, et de réchauffer les outils à la température des pièces à former.

Après toute déformation importante effectuée soit à froid, soit à une température de 300 à 500 °C, on doit opérer un recuit dit « de détente » au four électrique, à une température de 550 à 600 °C pendant quinze à trente minutes.

Le soudage des pièces ne donne actuellement de bons résultats que pour le titane non allié et l'alliage T-A5E ; la fragilité de la soudure n'est alors pas à craindre. Le procédé utilisé en France est le soudage à l'arc en atmosphère d'argon, et il faut éviter soigneusement que les parties chauffées à plus de 800 °C se trouvent en contact avec de l'oxygène, de l'hydrogène ou de l'azote. On termine l'opération par un recuit « de détente » à une température de 500 à 600 °C pendant trente minutes, suivi d'un refroidissement lent jusqu'à 200 °C.

Le façonnage des tubes et profilés en titane (ou en alliages de titane), par filage au travers de filières, est délicat et onéreux à réaliser, les produits ayant tendance au grippage sur les filières.

— *Opérations d'usinage.* — Les copeaux ayant tendance à coller aux outils de coupe (du fait de la faible conductibilité thermique du titane), il est nécessaire d'opérer avec de faibles vitesses de coupe et de refroidir la zone de travail et l'outil par une abondante lubrification.

En général, les conditions des opérations d'usinage sont analogues à celles des aciers inoxydables 18-8.

— *Décapage.* — Son but est d'éliminer la couche d'oxyde qui recouvre le titane (ou ses alliages) soit après élaboration, soit après chauffage au cours de la fabrication des pièces mécaniques. Le décapage est réalisé soit par sablage doux, soit par action chimique dans un bain aqueux constitué comme suit :

— faible oxydation : bain d'acide nitrique (HNO_3) : 20 à 25 % et d'acide fluorhydrique (HF) : 2 à 4 % ;

— moyenne oxydation : bain d'acide chlorhydrique (HCl) : 5 à 10 % et d'acide fluorhydrique : 1 à 2 % ;

— forte oxydation : effectuer d'abord un traitement en bain alcalin oxydant, à la soude (Na OH), à une température de 400 à 500 °C, puis décaper en bain acide, comme on vient de l'indiquer.

4.8.3. Le titane et ses alliages

1° *Désignations des nuances de fabrication du titane, et désignations de ses alliages.* — Ces désignations sont faites par des symboles normalisés répondant aux prescriptions de la norme NF A 02-001 précitée.

Les symboles des nuances du titane non allié comportent la lettre T (symbole abrégé de Ti) suivi d'un petit tiret puis d'un nombre indiquant la charge de rupture minimale de la nuance considérée.

Les symboles des alliages de titane comportent successivement : la lettre T ; un petit tiret ; le symbole abrégé de l'élément d'addition dont la teneur est la plus grande ; un

Propriétés physiques du titane comparées à celles d'autres métaux

Grandeurs considérées	Titane	Aluminium	Magnésium	Fer	Cuivre
Masse volumique (g/cm³)	4,50	2,70	1,74	7,87	8,96
Point de fusion (°C)	1 660	660	649	1 535	1 083
Point d'ébullition (°C)	3 287	2 467	1 090	2 750	2 567
Chaleur massique [cal/(g.°C)] 1 cal/(g.°C) = 4 180 J/(kg.K)					
— à 15 °C	0,121	0,211	0,245	0,109	0,093
— entre 0 et 500 °C	0,139				
Chaleur de fusion (kcal/mol)	5	2,5	1,4	3,6	3,1
Coefficient de conductivité thermique à 25 °C [cal/(cm.s.°C)] ; 1 cal/(cm.s.°C) = 418 W/(m.K)	0,04	0,50	0,35	0,17	0,92
Coefficient de dilatation linéaire à 25 °C $(°C)^{-1}$	$8{,}5 \times 10^{-6}$	$22{,}9 \times 10^{-6}$	$25{,}2 \times 10^{-6}$	$11{,}7 \times 10^{-6}$	$16{,}5 \times 10^{-6}$
Pouvoir émissif	0,5	0,1			
Résistivité à 20 °C (μΩ.cm) $1\ \mu\Omega.cm = 10^{-8}\ \Omega.m$	42	2,7	4,6	10	1,7
Perméabilité magnétique (10^{-7} H/m)	+ 1,25	+ 0,65	+ 0,55	ferro-magnétique	— 0,09
Température de la transformation allotropique (°C)	882			910	
Module d'élasticité (module de Young) (daN/mm²)	11 000	7 000	4 600	20 300	12 500
Pour mémoire :					
Numéro atomique	22	13	12	26	29
Masse atomique	47,90	26,98	24,31	55,84	63,54

Caractéristiques mécaniques du titane et de ses alliages à la température ambiante

Grandeurs considérées	T-50	T-60	T-C3 Fe	T-A4 M	T-A6 V	T-A5 E
Charge de rupture minimale (daN/mm²)	50	60	92	95	95	80
Limite élastique à 0,2 % (daN/mm²)	35	42	80	90	85	75
Module d'élasticité (module d'Young) (daN/mm²)	11 000	11 000	10 500	11 500	11 500	11 000
Allongement minimal :						
— sur barres et pièces forgées (%)	20	15	12	10	12	10
— sur tôles (épaisseur < 3 mm) (%)	24	22				
Coefficient de striction moyen :						
— sur barres et pièces forgées (%)	50	45	30 à 50	20 à 40	30 à 50	40
— sur tôles (épaisseur < 3 mm) (%)	50 à 55	40 à 50				
Dureté Brinell (nombre Brinell) (daN/mm²)	140 à 200	160 à 220	260 à 330	280 à 330	280 à 320	280 à 330
Résilience Mesnager	3 à 7	2 à 5	2,5 à 3,5	2,5 à 4,5	2 à 4	2,5 à 4,5
Limite de contrainte par flexion alternée, pour 10^8 cycles (daN/mm²)			50	55 à 60	50 à 55	40 à 45

nombre indiquant la valeur la plus voisine de cette teneur; le symbole abrégé du deuxième élément d'addition. Si les deux éléments d'addition ont la même teneur, on les inscrit dans l'ordre alphabétique.

2° *Nuances du titane non allié.* — La fabrication courante de la Société Titanium porte sur les deux nuances T-50 et T-60. Leurs teneurs limites en impuretés, exprimées en pourcentages sont approximativement :

— pour T-50 : O<0,15 ; C<0,1 ; H<0,015 ; N<0,07 ; Fe<0,2, Si<0,04 ;
— pour T-60 : O<0,2 ; C<0,2 ; H<0,015 ; N<0,08 ; Fe<0,5 ; Si<0,04.

Éventuellement, les nuances T-40 et T-70, peuvent aussi être fournies ; leurs teneurs limites en impuretés, (exprimées en pourcentages), sont approximativement :

— pour T-40 : O<0,1 ; C<0,05 ; H<0,015 ; N<0,05 ; Fe<0,12 ; Si<0,04 ;
— pour T-70 : O<0,3 ; C<0,2 ; H<0,020 ; N<0,1 ; Fe<0,5 ; Si<0,04.

3° *Alliages de titane.* — La fabrication courante de la Société Titanium précitée porte sur les alliages ci-après :

Symboles normalisés	Éléments d'addition au titane et leur teneur
T-C3 Fe	Chrome : 2,8 % et Fer : 1,5 %
T-A4M	Aluminium : 4 % et Manganèse : 4 %
T-A6V	Aluminium : 6 % et Vanadium : 4 %
T-A5E	Aluminium : 5 % et Étain : 2,5 %
Éventuellement, peut être également fourni l'alliage suivant :	
T-C2 Fe	Chrome : 2 % et Fer : 1,1 %

4° *Usages du titane et de ses alliages. Essor de leur production.* — Ce n'est que depuis 1948, à la suite des travaux du Luxembourgeois Kroll, que la métallurgie de ce matériau a été mise en œuvre et que l'on a reconnu l'intérêt de ses propriétés particulières et surtout de celles de ses alliages.

Les caractéristiques mécaniques du titane et de ses alliages, associées à une masse volumique de valeur moyenne et à une grande résistance à la corrosion, ont retenu rapidement l'attention. De nombreux débouchés ont été offerts à ces matériaux favorisant l'essor de leur production. Parmi ces débouchés, on peut notamment citer : l'aviation, l'armement, la marine, l'industrie chimique.

Dans l'aviation, il est utilisé pour les ailettes et disques de compresseurs aux étages où les températures dépassent 250 à 300 °C et pour les ferrures, cadres, caissons, revêtements en tôle, fuselages.

En électricité et en électronique il est utilisé :

— lorsqu'on a besoin d'un métal pratiquement amagnétique, léger, présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et résistant bien à la corrosion ;
— comme « dégazeur » (« getter ») dans les tubes électroniques. En effet, à chaud, ce métal fixe les gaz résiduels, ce qui permet d'accentuer le vide dans ces tubes.

4.9. Métallurgie de l'argent. — L'argent est un métal précieux connu depuis la plus haute antiquité mais dont l'utilisation industrielle est croissante.

4.9.1. Minerais. — On le rencontre : à l'état natif ou allié au cuivre (États-Unis d'Amérique), sous forme de sulfures (argyrose, argentopyrite), combiné à l'antimoine (antimoniures), à l'iode, au chlore (cérargyrite ou argent corné) ou associé à d'autres métaux (Pb, Au, Zn), et sous forme de combinés complexes (argyrythrose).

4.9.2. Élaboration. — Le procédé le plus utilisé est la cyanuration. Le minerai finement pulvérisé est traité par le cyanure de sodium en présence d'air (action oxydante). Selon la forme de l'argent dans le minerai, on obtient :

— Argent natif :

$$4\,Ag + 8\,NaCN + O_2 + H_2O \rightarrow 4\,Na\,[Ag(CN)_2] + 4\,NaOH$$

— Cérargyrite :

$$AgCl + 2\,NaCN \rightarrow Na\,[Ag(CN)_2] + NaCl$$

— Argyrose :

$$Ag_2S + 4\,NaCN + 2\,O_2 \rightarrow 2\,Na\,[Ag(CN)_2] + Na_2SO_4$$

L'argent est extrait de la solution par réduction au moyen de zinc métallique :

$$Zn + 2Ag\,[(CN)_2]\,Na \rightarrow Na_2\,[Zn\,(CN)_4] + 2\,Ag$$

L'amalgamation par le mercure n'est plus guère utilisée.

L'argent peut être obtenu comme sous-produit de la métallurgie du plomb qui contient 1 000 à 1 200 g d'argent par tonne. On l'extrait par :

— *zingage :* on ajoute du zinc au plomb argentifère fondu ; le zinc liquide est insoluble dans le plomb liquide, alors que l'argent est 3 000 fois plus soluble dans le zinc que dans le plomb ; on récupère l'argent dans l'alliage argent-zinc par distillation de ce dernier ;
— *pattinsonnage :* le plomb argentifère fondu est maintenu à une température située entre le liquidus et le solidus (V. chap. 1). Les cristaux de plomb pur qui apparaissent sont écumés. Le liquide restant contient tout l'argent ;
— *coupellation :* cette opération est destinée à éliminer le plomb de l'alliage obtenu par pattinsonnage. Le plomb est oxydé dans l'alliage fondu ; l'argent n'est pas oxydé et peut être aisément extrait.

On raffine l'argent par électrolyse.

Éléments et concentration	Caractéristiques diverses	Utilisation
Ag 90 % Cu 10 %	Dureté plus grande que celle de l'argent pur	Contacts électriques
Ag Ni 0,15 %	d°	Contacts électriques
Ag 98,5 % Si 1,5 %	d°	Contacts électriques
Ag 80 % Fe 20 %	d°	Contacts électriques
Ag 50 % W 50 %	d°	Contacts électriques
Ag 95 % Cu 5 %	Argent au titre légal français	Orfèvrerie
Ag 80 % Cu 20 %	Argent au titre légal	Orfèvrerie
Ag 33 % Cu 33 % Zn 33 %	Point de fusion : 740 °C	Brasure pour tous métaux
Ag 50 % Cu 15,5 % Zn 16,5 % Cd 18 %	Point de fusion : 630 °C	Brasure pour tous métaux
Ag 97 % Pb 3 %	Supporte de fortes charges sans fissuration	Coussinets de moteur
Ag 20 à 30 % Cu 35 à 50 % Ni 25 à 30 %	Alliage appelé Ruolz	Orfèvrerie

4.9.3. Applications de l'argent et de ses alliages. — On dépose l'argent métallique par réduction chimique de ses composés au moyen de glucose, formaldéhyde ou sel de seignette (argenture des miroirs). On dépose également celui-ci par électrolyse dans un but de protection ou de décoration. L'électrolyte est en général une solution aqueuse de cyanure double, d'argent et de potassium ; l'anode est en argent pur et l'objet à argenter constitue la cathode.

Les alliages d'argent ont de nombreuses applications notamment en orfèvrerie et en électricité.

4.10. Métallurgie de l'uranium. — L'uranium a été découvert, en 1789, par Klapproth ; le métal a été isolé pour la première fois par Peligot en 1841. Ce métal naturellement radioactif est utilisé comme combustible nucléaire.

4.10.1. Minerais. — Les minerais principaux de l'uranium sont extrêmement nombreux :
- — la pechblende (U_3O_8) qui contient jusqu'à 90 % d'uranium,
- — l'uraninite (UO_2, UO_3) et ses variétés : becquerelite, curite, gummite ;
- — l'uranothorianite, oxyde d'uranium et de thorium ;
- — la soddite (silicate d'uranium) ;
- — la carnotite et la ferghanite (vanadates d'uranium) ;
- — la broeggerite (arséniate d'uranium) ;
- — l'autunite (phosphate double d'uranium et de calcium) ;
- — la liebigite (carbonate double d'uranium et de calcium) ;
- — la betafite (niobiotitanate d'uranium).

On trouve des minerais d'uranium au Congo, au Canada, aux États-Unis d'Amérique, à Madagascar, en U.R.S.S., en Australie, en Allemagne (Saxe) et en France.

4.10.2. Traitement. — Après enrichissement, la pechblende est soumise à une fusion alcaline qui donne de l'uranate de sodium Na_2UO_4. Celui-ci est purifié et transformé en uranate d'ammonium qui, après calcination, donne de l'oxyde vert d'uranium U_8O_3. On réduit ensuite cet oxyde par le carbone au four électrique.

4.10.3. Emploi de l'uranium. — Le nombre d'isotopes de l'uranium atteint 17 ; l'un d'entre eux, l'uranium 235, dont l'abondance relative est voisine de 0,7 %, est fissible sous l'action des neutrons thermiques. La fission d'un atome d'uranium 235 fournit des fragments de masse moyenne et deux à trois neutrons qui, après avoir été ralentis, peuvent réagir avec des noyaux d'uranium 235, et provoquer de nouvelles fissions. Dans les piles ou réacteurs nucléaires, la réaction est contrôlée afin qu'elle ne devienne pas explosive : des modérateurs absorbent une partie de ces neutrons ralentis par des thermalisants et confinés par des réflecteurs.

La masse critique, qui permet le démarrage de la réaction, est de quelques kilogrammes pour l'uranium 235 pur, et est des milliers de fois plus grande pour l'uranium naturel. L'uranium 235 peut être séparé de l'isotope le plus abondant, l'uranium 238, par formation d'hexafluorure d'uranium gazeux (à partir d'uranium naturel métallique ou combiné) et diffusion au travers de filtres extrêmement fins : la différence de masse des deux isotopes permet de les séparer.

L'uranium 235 pur est utilisé dans les armes nucléaires. L'uranium 238 plus ou moins enrichi en uranium 235, est utilisé dans les réacteurs rapides. Dans certains d'entre eux, dits réacteurs autorégénérateurs, il y a production d'une quantité de matière fissible supérieure à la consommation d'uranium 235. On dit que l'uranium 235 est le combustible primaire, l'uranium 238 le combustible fertile et le plutonium 239, formé par la réaction, est appelé combustible secondaire.

L'uranium, sous l'effet des réactions nucléaires, se déforme, devient poreux et cassant ; on remédie partiellement à ces inconvénients en effectuant des alliages avec des éléments stabilisant ses propriétés structurales et mécaniques (Mo, Al, par exemple).

On utilise également certains de ses composés chimiques, UO_2, UC_1, U_2C_3, UC_2, agglomérés par frittage.

CHAPITRE IV
CORROSION ET PROTECTION DES MÉTAUX

1. LES PHÉNOMÈNES DE CORROSION

1.1. Définition de la corrosion. — La corrosion est un phénomène superficiel qui affecte l'apparence et même la durée des matériaux métalliques par passage de ceux-ci de l'état élémentaire à l'état de combinaisons. Elle est provoquée par l'action du milieu et elle est fonction d'un certain nombre de paramètres : composition, homogénéité physico-chimique, nature du milieu, température, nature des éléments en présence, propriétés des produits de corrosion, etc. On constate que certains matériaux sont inaltérables (métaux nobles, Au, Pt, etc.), que d'autres, après une réaction superficielle, se stabilisent (Al très pur, Cr, etc.) et que pour certains autres la corrosion se poursuit jusqu'à destruction complète (fer). De plus, selon les conditions, les mécanismes mis en jeu peuvent être différents.

1.2. Mécanismes de la corrosion

1.2.1. Corrosion électrochimique

1° *Corrosion par hétérogénéité des matériaux.* — Lorsque l'on plonge un élément métallique dans une solution d'un de ses sels, on constate qu'il prend un potentiel déterminé que l'on peut mesurer, en circuit ouvert, par

Potentiels électrochimiques

Élément	Potentiel	Élément	Potentiel
Au	+ 1,42	Cr	— 0,55
Pd	+ 0,99	Ga	— 0,56
Hg	+ 0,85	Zn	— 0,76
Ag	+ 0,80	Mn	— 1,03
Pt	+ 0,73	V	— 1,2
Cu	+ 0,34	Al	— 1,70
Calomel		Ce	— 2,33
KCl saturé	+ 0,24	Mg	— 2,37
H	0	Na	— 2,71
P	— 0,13	Ca	— 2,76
Sn	— 0,14	Sr	— 2,89
Ni	— 0,23	Ba	— 2,90
Co	— 0,28	Cs	— 2,92
Ti	— 0,33	K	— 2,92
In	— 0,34	Rb	— 2,93
Cd	— 0,40	Li	— 3,05
Fe	— 0,41		

rapport à une électrode de référence (électrode à hydrogène). Ce potentiel caractérise le métal considéré. Les différents éléments peuvent être classés en fonction de ce potentiel. Ceux dont le potentiel est supérieur à 0 (potentiel de l'électrode de référence par rapport à une autre de même nature) sont dits nobles. Tout élément occupant un rang n dans la classification électrochimique (classification dite américaine) est plus noble que celui de rang $n - 1$.

Le potentiel mesuré représente la f.é.m. de la pile formée par l'électrolyte et les électrodes; celle constituée par l'élément le moins noble joue le rôle d'anode, et l'autre, le rôle de cathode. Lorsque l'on fait varier le débit de cette pile, en général, le potentiel de l'anode, ou celui de la cathode ou des deux à la fois sont modifiés. Il est possible d'étudier ces variations en mesurant le potentiel, positif ou négatif, de l'électrode du métal à étudier (fig. IV-1) et en faisant passer un courant I. On peut tracer ainsi la courbe $V = f(I)$ pour chacune des électrodes représentant le couple de métaux mis en présence.

Lorsque l'on fait passer le courant, si le seul potentiel de la cathode varie, on dit qu'on est sous contrôle cathodique; si seul le potentiel de l'anode varie, on est sous contrôle anodique (fig. IV-2), et si les deux varient, il y a contrôle simultané (fig. IV-3).

Dans un milieu formant électrolyte la corrosion est régie par les lois électrochimiques applicables aux piles: l'anode se dissout si les produits de corrosion sont solubles dans l'électrolyte, ou se transforme si ceux-ci forment une couche non étanche.

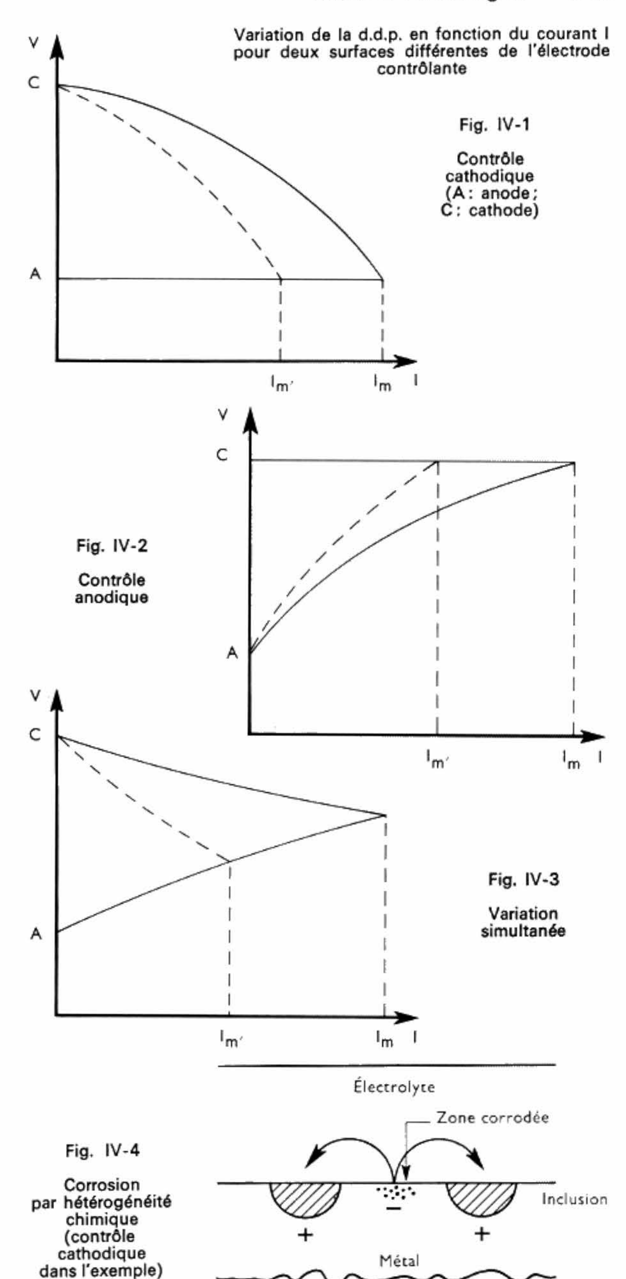
En pratique, la plupart des piles fonctionnent sous contrôle cathodique; la cathode n'est donc pas attaquée, et c'est l'anode qui se corrode. Cette observation est importante, car, expliquant le mécanisme du phénomène, elle permet de connaître les précautions à prendre pour l'éviter, la minimiser ou empêcher son aggravation.

D'une façon générale, les matériaux et le milieu considérés doivent être homogènes de telle sorte que les différentes parties soient au même potentiel. Lorsque ces conditions ne peuvent être respectées, ce qui est habituellement le cas, il se forme de petites piles locales (fig. IV-4) qui entraînent la corrosion. Dans cette hypothèse, il est nécessaire de considérer que le facteur essentiel qui intervient est la surface des électrodes S_A et S_C. Les potentiels de celles-ci sont respectivement égaux à:

pour la cathode: $E_C = E_{C_0} - f\left(\frac{I}{S_C}\right)$

et pour l'anode: $E_A = E_{A_0} - f\left(\frac{I}{S_A}\right)$

Il en résulte que lorsque l'on diminue la surface de l'électrode, la pente de la courbe de polarisation correspondante augmente. Ainsi lorsque l'on diminue la surface cathodique d'une pile fonctionnant sous contrôle cathodique, I décroît et la densité de courant cathodique ne varie pas. Au contraire si l'on diminue la surface anodique, I qui



Variation de la d.d.p. en fonction du courant I pour deux surfaces différentes de l'électrode contrôlante

Fig. IV-1 Contrôle cathodique (A: anode; C: cathode)

Fig. IV-2 Contrôle anodique

Fig. IV-3 Variation simultanée

Fig. IV-4 Corrosion par hétérogénéité chimique (contrôle cathodique dans l'exemple)

dépend de la cathode reste constant, et la densité de courant anodique augmente: la corrosion se trouve accélérée.

On peut citer comme exemple de corrosion due à l'hétérogénéité physico-chimique des alliages ou à l'assemblage de métaux différents:

— La corrosion des alliages d'aluminium à 4 % de cuivre (dural). Après trempe, ce type d'alliage est monophasé: le cuivre forme une solution solide homogène avec l'aluminium. Dans ce cas, il n'y a pas de risque de corrosion électrochimique. Après revenu provoquant la précipitation de Al_2Cu, l'échantillon n'est plus monophasé et le potentiel de Al_2Cu étant différent de celui de la solution solide, il se forme des micropiles locales. Dans cet état, l'alliage est très sensible à la corrosion notamment en atmosphère marine. En revanche, si la solution sursaturée ne se décompose pas (comme dans les alliages Al-Mg), on ne rencontre pas de corrosion de ce type.

— Si l'on assemble deux métaux ou alliages différents, on constate toujours une corrosion de ce type, même si les deux matériaux ne sont pas étroitement associés. Ainsi on observe une intense corrosion des coques de navire (acier) due à la présence des hélices de bronze (cet alliage étant plus noble) si une protection spéciale n'est pas prévue.

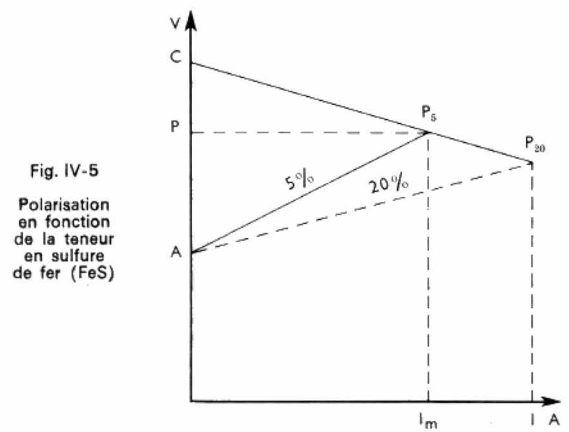


Fig. IV-5

Polarisation en fonction de la teneur en sulfure de fer (FeS)

— La corrosion des aciers est souvent due à la présence de sulfure de fer. Dans ce cas, les inclusions de FeS se comportent comme des anodes et la corrosion provoque finalement une percée par disparition du sulfure de fer. Si la quantité de FeS croît, le nombre des anodes croît, et l'échantillon est de plus en plus corrodable. La courbe de polarisation (fig. IV-5) varie en fonction de la teneur; si P_5 est le potentiel pour 5 % de FeS et P_{20} celui correspondant à 20 % de FeS, on peut déduire que P_5 étant supérieur à P_{20}, le deuxième échantillon est beaucoup plus attaquable.

2° *Corrosion par courants vagabonds.* — Dans les terrains urbains ou industriels, on observe des courants dans le sol (ils proviennent d'installations électriques diverses). Ces courants de fuite à travers des installations, plus ou moins oxydées, sont redressées et ils provoquent des corrosions lorsque, passant par des installations enterrées, ils quittent celles-ci (la zone par où sort ce courant joue le rôle d'anode). En général, dans ces conditions les pertes de poids sont relativement faibles car la corrosion se fait aux joints de grains et elle provoque la désagrégation du métal (fig. IV-6).

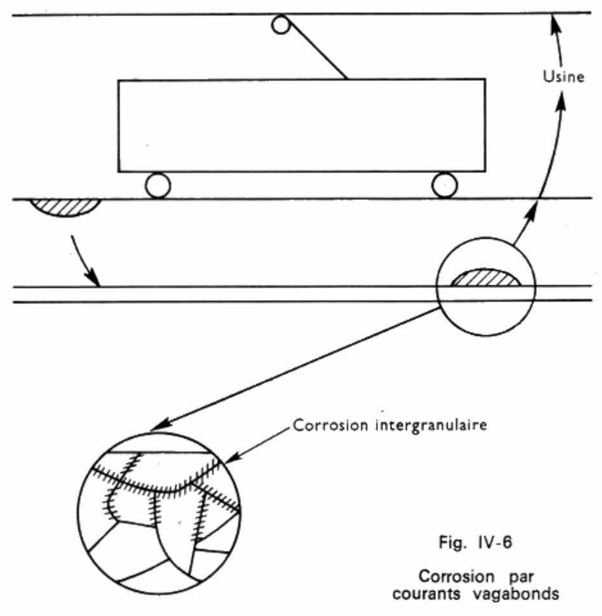


Fig. IV-6

Corrosion par courants vagabonds

3° *Corrosion par hétérogénéité du milieu.* — Ce phénomène découvert par Evans est appelé *effet Evans* ou corrosion par aération différentielle. On peut l'observer lorsque l'on plonge une plaque de fer dans une solution de chlorure de sodium désaérée : au bout d'un certain temps on constate une corrosion du fer légèrement au-dessous du niveau de la surface de séparation. Ce phénomène est dû à la dissolution de l'oxygène de l'air qui rend la zone supérieure cathodique et la zone inférieure anodique. Cet effet peut être mis en évidence par addition de phénol phtaléine et de ferrocyanure de potassium ; dans ce cas, on observe une zone rose à la surface, les ions Na^+ se sont déchargés à la cathode et ont formé de la soude, alors que dans la zone inférieure, on observe une zone verte due à l'apparition d'ions ferreux dans la zone anodique.

Le phénomène peut être étudié quantitativement en construisant une pile basée sur ce principe (fig. IV-7), appelée *pile Evans* et en mesurant la d.d.p. ou le débit. On constate que le débit augmente en fonction de la concentration en oxygène. Cet élément a deux effets : d'une part il oxyde la cathode mais si la couche d'oxyde est continue et imperméable, il la rend plus résistante et l'effet est favorable, d'autre part par oxydation il détruit la gaine d'hydrogène qui s'est formée et qui, isolant la cathode, faisait décroître le débit de la pile : il agit comme dépolarisant et l'effet est défavorable.

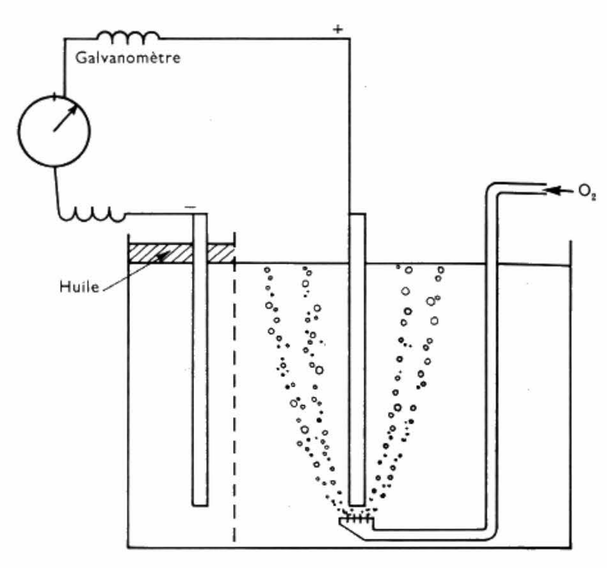


Fig. IV-7 — Pile Evans

Le même phénomène s'observe sur une goutte déposée à la surface de l'échantillon. Si pour simuler des gouttes de brouillard ou des embruns fortement oxygénés, on ajoute de l'eau oxygénée à la solution, l'effet s'inverse et l'attaque s'effectue sur les bords (fig. IV-8).

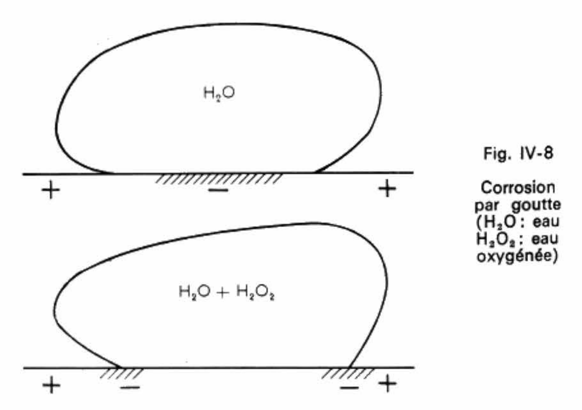


Fig. IV-8

Corrosion par goutte (H_2O : eau H_2O_2 : eau oxygénée)

En conséquence, si un échantillon est soumis à un brouillard salin, on observe une multitude de points attaqués par effet Evans (cette propriété est utilisée comme méthode d'essai).

L'état de surface a une très grande influence sur la tenue à la corrosion. S'il y a une rayure (fig. IV-9) sur l'échantillon, l'oxygène atteint plus facilement la partie externe que

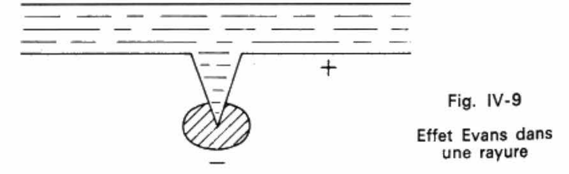


Fig. IV-9

Effet Evans dans une rayure

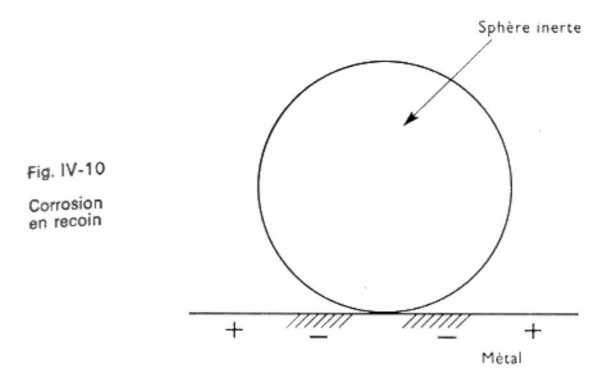


Fig. IV-10
Corrosion en recoin

le fond de la rayure et celui-ci devient anode; la corrosion est d'autant plus grave que l'anode est très petite et que le phénomène ne peut aller qu'en s'amplifiant jusqu'à perforation complète.

La formation de recoin est également favorable à l'apparition de corrosions graves par aération différentielle; cela peut être mis en évidence en disposant une sphère (même en matériau inerte comme le verre) sur un échantillon (fig. IV-10).

1.2.2. Corrosions chimiques

1° *L'oxydation.* — La corrosion par oxydation est certainement l'une des plus répandue. Étant donnée l'humidité habituelle de l'air, à température ambiante il se produit simultanément une oxydation et une corrosion électrochimique; en revanche, à haute température, il y a seulement oxydation.

En général vis-à-vis de l'oxydation on distingue deux classes de métaux, selon que l'oxyde occupe un volume inférieur ou supérieur à celui du métal détruit pour le produire. Dans le premier cas (Na, K, Mg, Ca), les oxydes sont poreux et sans valeur protectrice; le taux d'oxydation est uniforme et la croissance du film est linéaire. Dans le second cas (Be, Al, Fe, Ni, Cu, Zn) les oxydes recouvrent uniformément la surface métallique; au début l'oxydation est très rapide mais elle se ralentit ensuite à mesure que la couche d'oxyde s'épaissit. Cette loi n'est vraie qu'a partir d'une température suffisamment élevée pour que la couche d'oxyde soit assez plastique et ne se craquelle pas (fig. IV-11). Dans le cas contraire, la fissuration de la couche d'oxyde permet d'obtenir une loi linéaire continue ou discontinue selon la fréquence d'apparition des fissures (exemple: Zn).

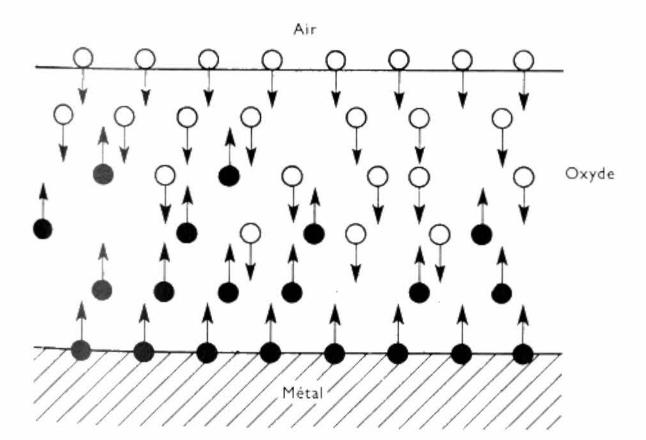


Fig. IV-11 — Formation d'une couche d'oxyde stable

À température plus élevée, l'oxydation dépend du nombre d'états de valence des métaux. Lorsque ceux-ci n'ont qu'une valence, l'oxyde est un composé parfaitement défini et électriquement isolant; dans ce cas, la protection est parfaite dès que le film d'oxyde atteint une certaine épaisseur (Al, Be). Lorsque le métal a plusieurs valences, il se forme des oxydes de composition variable de l'extérieur vers l'intérieur; du fait d'un défaut de cations ces compositions ne correspondent pas strictement à la composition stœchiométrique. Ce gradient de concentration permet la diffusion du métal vers l'extérieur par un mécanisme lacunaire accompagné d'un flux d'électrons (par exemple: Fe, Cu, Ni, Co, W). La loi de croissance du film d'oxyde est parabolique dans ce cas et l'oxydation se poursuit indéfiniment. Toutefois si le défaut stœchiométrique est d'ordre anionique, la diffusion cathionique est très faible et la corrosion se trouve rapidement arrêtée: c'est le mécanisme rencontré dans l'oxydation du chrome ou des alliages riches en cet élément.

2° *Corrosion par les acides et les bases.* — Selon leur nature, les éléments métalliques sont susceptibles d'être attaqués par les composés chimiques acides ou basiques. La connaissance des lois classiques de la chimie permet de rendre compte de ces phénomènes et le choix judicieux des métaux ou alliages destinés à la construction des ensembles soumis aux contraintes chimiques permet de résoudre les problèmes posés par cette corrosion.

1.2.3. Corrosions physiques

1° *Corrosion sous contrainte.* — Ce type de corrosion s'observe pour un grand nombre de métaux et alliages, il est d'autant plus insidieux que les contraintes peuvent être dues à l'écrouissage. Ces contraintes sont la cause d'une réaction particulièrement vive aux phénomènes de corrosion, notamment en présence de certains composés chimiques. Ce type de corrosion est fréquemment intergranulaire (season craking des laitons écrouis en présence d'air humide contenant des traces d'ammoniac).

2° *Corrosion sous usure.* — Lors du frottement de deux matériaux métalliques l'un sur l'autre, des quantités de chaleur suffisantes peuvent apparaître, et provoquer une accélération des phénomènes de corrosion chimiques ou par oxydation.

2. PROTECTION CONTRE LA CORROSION

La protection contre la corrosion peut s'effectuer de différentes façons, soit en rendant le milieu non agressif à l'encontre des matériaux, soit en rendant les matériaux passifs pour le milieu considéré, soit en isolant les matériaux du milieu par un revêtement inerte, soit en provoquant des conditions électrochimiques telles que le métal ou l'alliage considéré deviennent cathodiques. Aucune de ces protections n'est absolument parfaite, et il faut être conscient de leurs limites d'utilisation.

2.1. Protections électrochimiques

2.1.1. Protection anodique. — La pièce à préserver est reliée à une pièce constituée d'un métal moins noble, destinée à être détruite; il faut veiller à ce que le milieu entourant le métal anodique soit conducteur. C'est le cas de la protection des canalisations en alliages ferreux ou des coques de navire (hélices de bronze plus noble) à l'aide de plaques de zinc ou de magnésium (métaux anodiques par rapport aux alliages ferreux). Ces éléments se corrodent tout en assurant la protection des pièces importantes (fig. IV-12).

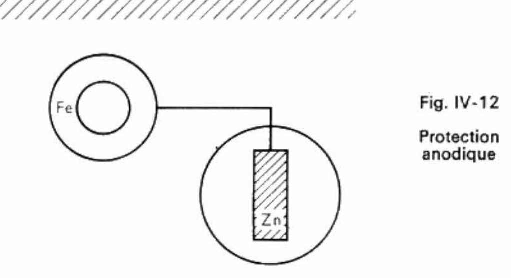


Fig. IV-12
Protection anodique

2.1.2. Protection par potentiel imposé. — Dans certaines installations fixes où les pièces sont plongées dans un électrolyte, il est possible d'assurer la protection des pièces en appliquant une d.d.p. convenable. La pièce à protéger doit être portée à un potentiel plus faible que la pièce qui joue le rôle d'anode. Celle-ci peut dans ces conditions être en métal plus noble, que la pièce à protéger.

2.1.3. Protection par modification du milieu. — Il est également possible d'ajouter au milieu des composés chimiques (inhibiteurs de corrosion) qui, même en très petite quantité, permettent de protéger les métaux car ils provoquent la formation de composés insolubles superficiels. On distingue :

— les composés de type cathodique qui forment à la cathode un composé insoluble et abaissent, ou suppriment, le courant de corrosion. Dans ce cas, il n'y a pas de risque d'accroissement local de la corrosion ;

— les composés de type anodique qui isolent l'anode.

Ce type de protection doit faire l'objet d'un soin particulier. En effet, si l'on utilise un inhibiteur anodique dans un système à contrôle cathodique, il va avoir tendance à diminuer la surface des anodes ; si la quantité d'inhibiteur utilisée est insuffisante, la densité de courant anodique va croître et elle provoque une corrosion ponctuelle extrêmement rapide de celle-ci.

2.1.4. Protection par modification du comportement du matériau. — Dans certains cas, et notamment en ce qui concerne l'oxydation, des éléments tels que le chrome sont protégés car ils se recouvrent d'une couche d'oxyde stable qui empêche le développement ultérieur de la corrosion ; c'est le phénomène de *passivation*. Dans certaines conditions, ces éléments peuvent assurer des propriétés identiques aux alliages dans les compositions desquelles ils entrent. C'est le cas d'une catégorie particulièrement importante de ceux-ci : les aciers dits inoxydables. Si l'on mesure le potentiel de dissolution des alliages fer-chrome en fonction de la teneur en chrome (fig. IV-13), on

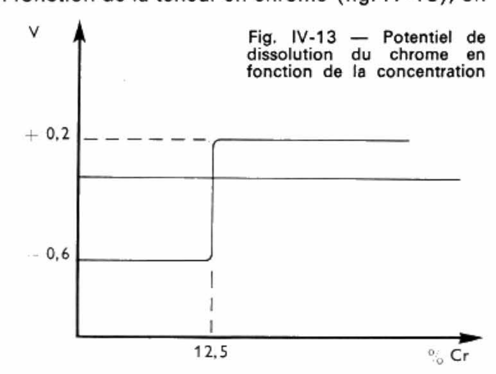


Fig. IV-13 — Potentiel de dissolution du chrome en fonction de la concentration

observe que le potentiel varie brusquement dès que la concentration atteint 12,5 % : l'alliage devient passif. Si un tel alliage est immergé dans un réactif oxydant, on observe une passivation immédiate par formation d'une couche d'oxyde ; cette passivation ne peut être détruite que par la présence d'ions chlore Cl^-.

Lorsque l'on fait varier le potentiel appliqué du potentiel anodique au potentiel cathodique, l'intensité du courant augmente, s'annule pour un potentiel correspondant au potentiel de dissolution, passe par un maximum puis diminue et devient presque nulle ; ensuite elle croît de nouveau brusquement pour une valeur E' du potentiel. Dans le domaine anodique le métal est attaqué et la pile débite, mais quand on l'oxyde il se forme une couche passivante qui provoque une forte diminution du débit. Quand le point E' est dépassé, la couche protectrice est rompue, et l'attaque recommence.

Pour que le phénomène puisse s'observer, il faut que l'alliage obtenu satisfasse aux trois règles de Portevin : homogénéité, concentration suffisante en chrome, formation de la couche autoprotectrice.

Dans un acier inoxydable 18-8, il y a deux éléments présents simultanément : le chrome alphagène qui diminue le domaine γ mais assure la passivité, le nickel gammagène qui agrandit le domaine γ et assure l'homogénéité (fig. IV-14). Dans ces conditions la phase γ est normalement stable entre 700 et 1 300 °C, mais la vitesse critique de trempe est si faible que, quelle que soit la vitesse de refroidissement, on obtient la phase γ et l'alliage satisfait aux règles de Portevin. Cependant, si l'alliage contient du carbone, il faut éviter la précipitation de carbures par un refroidissement trop lent car ce phénomène a des conséquences importan-

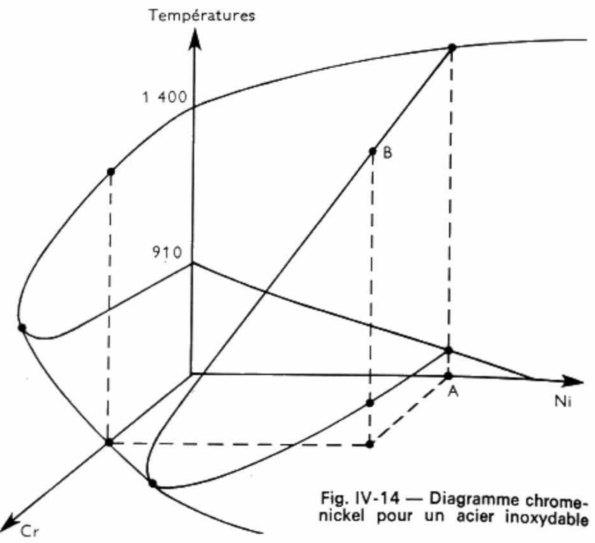


Fig. IV-14 — Diagramme chrome-nickel pour un acier inoxydable

tes : la règle d'homogénéité n'est plus respectée. En effet, le chrome, en solution combiné au carbone, précipite dans les joints de grains entraînant dans ces zones un appauvrissement, et la concentration en chrome devient inférieure à la concentration critique. Il se produit alors une corrosion intergranulaire particulièrement insidieuse et dangereuse. Ce défaut est particulièrement favorisé dans les opérations de soudure, car, même si les conditions de refroidissement sont convenables, il existe un isotherme où les carbures ont précipité, et où l'on peut observer des ruptures par corrosion fissurante.

Il est possible de remédier à ce défaut par diminution de la teneur en carbone (aciers à faible teneur en carbone), par recuisson de la pièce pour uniformiser la teneur en chrome, par des additions de métaux plus avides de carbone que le chrome : titane ou niobium (aciers stabilisés).

2.2. Protection par dépôt

2.2.1. Protection par dépôt électrolytique. — Il est possible de protéger les métaux et alliages par le dépôt judicieux d'un métal assurant l'isolement du matériau métallique. On distingue :

— Les revêtements qui assurent une protection anodique. Ce sont les meilleurs car même en cas de rupture du dépôt celui-ci assure encore la protection du substrat, et cela dans de très larges mesures, étant en présence d'une anode de grandes dimensions et de cathodes de petites dimensions. C'est le cas de la protection de l'acier par un dépôt de zinc.

— Les revêtements par une couche compacte d'un métal noble ; celui-ci agissant uniquement par isolement, il ne doit pas présenter de discontinuités. Dans le cas contraire, la corrosion peut être grave (petite anode, grande cathode). À titre d'exemple, on peut citer la protection de l'acier par nickelage.

Les dépôts électrolytiques sont réalisés dans des solutions d'un sel de l'élément à déposer. L'objet à protéger est placé à la cathode ; l'anode est fabriquée à partir du métal de dépôt (anode soluble), ou à partir d'un métal inattaquable (anode insoluble) ; le dépôt s'effectue alors par épuisement de l'électrolyte. L'épaisseur est fonction de la durée de l'électrolyse et de l'intensité du courant traversant l'électrolyte.

De nombreux métaux peuvent être déposés par ce procédé (cuivre, zinc, nickel, chrome, cadmium, plomb, étain) et même certains alliages (laiton).

2.2.2. Protection par traitement à chaud. — On passe les pièces à recouvrir dans un bain du métal protecteur fondu ; celui-ci est habituellement le plomb (plombage), le zinc (galvanisation) ou l'étain (étamage).

Les traitements fournissent des dépôts irréguliers, et en raison de la température, sont susceptibles de modifier la structure des pièces. Bien que ces procédés soient relativement coûteux, ils sont utilisés, en raison de leur rapidité, pour les dépôts en continu (tôles, fils, etc.). En outre, la

LISTE DES ÉLÉMENTS NATURELS ET ARTIFICIELS

Nom de l'élément	Symbole	Masse atomique
Actinium	Ac	(227)
Aluminium	Al	26,981 5
Américium	Am	(243)
Antimoine	Sb	121,75
Argent	Ag	107,870
Argon	Ar	39,948
Arsenic	As	74,921 6
Astate ou alabame	At	(210)
Azote	N	14,006 7
Baryum	Ba	137,34
Berkélium	Bk	(245)
Béryllium ou glucinium	Be	9,012 2
Bismuth	Bi	208,980
Bore	B	10,811
Brome	Br	79,909
Cadmium	Cd	112,40
Calcium	Ca	40,08
Californium	Cf	(251)
Carbone	C	12,011 15
Cérium	Ce	140,12
Césium	Cs	132,905
Chlore	Cl	35,453
Chrome	Cr	51,996
Cobalt	Co	58,933 2
Cuivre	Cu	63,54
Curium	Cm	(247)
Dysprosium	Dy	162,50
Einsteinium	Es	(254)
Erbium	Er	167,26
Étain	Sn	118,69
Europium	Eu	151,96
Fer	Fe	55,847
Fermium	Fm	(253)
Fluor	F	18,998 4
Francium	Fr	(223)
Gadolinium	Gd	157,25
Gallium	Ga	69,72
Germanium	Ge	72,59
Hafnium	Hf	178,49
Hahnium	Ha	261,45
Hélium	He	4,002 6
Holmium	Ho	164,930
Hydrogène	H	1,007 97
Indium	In	114,82
Iode	I	126,904 4
Iridium	Ir	192,2
Kourchatovium	Ku	(260)
Krypton	Kr	83,80
Lanthane	La	138,91
Lawrencium	Lr	—
Lithium	Li	6,939
Lutétium	Lu	174,97
Magnésium	Mg	24,312
Manganèse	Mn	54,938 0
Mendélévium	Md	(256)
Mercure	Hg	200,59
Molybdène	Mo	95,94
Néodyme	Nd	144,24
Néon	Ne	20,183
Neptunium	Np	(237)
Nickel	Ni	58,71
Niobium	Nb	92,906
Nobélium	No	(253)
Or	Au	196,967
Osmium	Os	190,2
Oxygène	O	15,999 4
Palladium	Pd	106,4
Phosphore	P	30,973 8
Platine	Pt	195,09
Plomb	Pb	207,19
Plutonium	Pu	(242)
Polonium	Po	(210)
Potassium	K	39,102
Praséodyme	Pr	140,907
Prométhéum ou illinium	Pm	(147)
Protactinium	Pa	(231)
Radium	Ra	(226)
Radon	Rn	(222)
Rhénium	Re	186,2
Rhodium	Rh	102,905
Rubidium	Rb	85,47
Ruthénium	Ru	101,07
Samarium	Sm	150,35
Scandium	Sc	44,956
Sélénium	Se	78,96
Silicium	Si	28,086
Sodium	Na	22,989 8
Soufre	S	32,064
Strontium	Sr	87,62
Tantale	Ta	180,948
Technétium ou mazurium	Tc	(99)
Tellure	Te	127,60
Terbium	Tb	158,924
Thallium	Tl	204,37
Thorium	Th	232,038
Thulium	Tm	168,934
Titane	Ti	47,90
Tungstène	W	183,85
Uranium	U	238,03
Vanadium	V	50,942
Xénon	Xe	131,30
Ytterbium	Yb	173,04
Yttrium	Y	88,905
Zinc	Zn	65,37
Zirconium	Zr	91,22

La référence de masse est l'isotope $^{6}_{12}C$ du carbone. $^{6}_{12}C = 12{,}000\ 00$

température assure, une excellente liaison avec le substrat car elle favorise la diffusion.

2.2.3. Protection par projection. — Ce procédé, appelé encore *shoopage*, consiste à projeter sur la surface à protéger au moyen d'un pistolet à air comprimé, des particules très divisées du métal choisi, celui-ci ayant été porté à une température supérieure à son point de fusion. Actuellement, l'utilisation de pistolet à plasma permet d'atteindre des températures qui autorisent la fusion de métaux aussi réfractaires que le tungstène ou de certains oxydes métalliques.

2.2.4. Traitements thermochimiques. — Les traitements thermochimiques sont de différentes natures. Les plus connus sont :

— *La calorisation :* le substrat, préalablement recouvert d'un dépôt du métal de protection (aluminium, dans ce cas), est porté à température élevée un temps suffisant pour assurer la diffusion.

— *La shérardisation* consiste à traiter les pièces à chaud dans une enceinte étanche contenant des vapeurs de zinc. Ce procédé n'est évidemment pas applicable aux pièces ayant subi un traitement thermique ; en outre dans le cas des aciers, il risque de provoquer un grossissement du grain amenant la fragilisation.

— *La chromisation* est un traitement des aciers par dépôt de chrome (provenant de la décomposition d'un halogénure à haute température) et diffusion. Ce traitement coûteux présente le double avantage de rendre inoxydable à chaud la surface des pièces, et de lui conférer une dureté remarquable.

2.2.5. Traitements chimiques. — Divers traitements chimiques peuvent être pratiqués, associés ou non à des couches complémentaires de peintures. Dans le cas des aciers, les plus connus sont :

— *La parkérisation* qui consiste à provoquer à la surface du métal la formation d'un dépôt de phosphate de fer continu, uniforme et imperméable. Ce dépôt est réalisé en utilisant des bains de phosphates portés à ébullition.

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Groupe	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			O
Période	a b	a b	a b	a b	a b	a b	a b				
1	**1H** 1,007 97										**2He** 4,0026
2	**3Li** 6,939	**4Be** 9,0122	**5B** 10,11	**6C** 12,01115	**7N** 14,0067	**8O** 15,9994	**9F** 18,9984				**10Ne** 20,183
3	**11Na** 22,9898	**12Mg** 24,312	**13Al** 26,9815	**14Si** 28,086	**15P** 30,9738	**16S** 32,064	**17Cl** 35,453				**18Ar** 39,948
4	**19K** 39,102	**20Ca** 40,08	**21Sc** 44,956	**22Ti** 47,80	**23V** 50,942	**24Cr** 51,996	**25Mn** 54,9381	**26Fe** 55,847	**27Co** 58,9332	**28 Ni** 58,71	
	29Cu 63,54	**30Zn** 65,37	**31Ga** 69,72	**32Ge** 72,59	**33As** 74,9216	**34Se** 78,96	**35Br** 79,909				**36Kr** 83,80
5	**37Rb** 85,47	**38Sr** 87,62	**39Y** 88,905	**40Zr** 91,22	**41Nb** 92,906	**42Mo** 95,94	**43Tc** (99)	**44Ru** 101,07	**45Rh** 102,905	**46Pd** 106,4	
	47Ag 107,870	**48Cd** 112,40	**49In** 114,82	**50Sn** 118,9	**51Sb** 121,75	**52Te** 127,60	**53I** 126,9044				**54Xe** 131,30
6	**55Cs** 132,905	**56Ba** 137,34	**57 à 71** Lanthanides	**72Hf** 178,49	**73Ta** 180,948	**74W** 183,85	**75Re** 186,2	**76Os** 190,2	**77Ir** 192,2	**78Pt** 195,09	
	79Au 196,967	**80Hg** 200,59	**81Tl** 204,37	**82Pb** 207,19	**83Bi** 208,980	**84Po** (210)	**85At** (210)				**86Rn** (222)
7	**87Fr** (223)	**88Ra** (226)	**89Ac** (227)	**90Th** 232,038	**91Pa** (231)	**92 à 104** Uranides					
Lanthanides ou Terres Rares			**57La** 138,91	**58Ce** 140,12	**59Pr** 140,907	**60Nd** 144,24	**61Pm** (147)	**62Sm** 150,35	**63Eu** 151,96	**64Gd** 157,25	**65Tb** 158,924
66Dy 162,50	**67Ho** 164,930	**68Er** 167,26	**69Tm** 168,934	**70Yb** 173,04	**71Lu** 174,97						
Uranides		**92U** 238,03	**93Np** (237)	**94Pu** (242)	**95Am** (243)	**96Cm** (247)	**97Bk** (245)	**98Cf** (251)	**99Es** (254)	**100Fm** (253)	**101Md** (256)
102No 253	**103Lr**	**104 Ku** 260	**105 Ha**								

Au-dessous du symbole de chaque élément est indiquée la masse atomique relative moyenne du mélange des isotopes naturels de celui-ci. Les masses entre parenthèses représentent celles de l'isotope le plus stable de l'élément radioactif considéré. La référence de masse est celle de l'isotope 12 du carbone, en vigueur depuis 1961 : $^{12}_{6}C = 12{,}000\,00$. Le nombre placé devant le symbole du corps représente son numéro atomique Z

— *La bondérisation* procédé assez voisin du précédent mais plus économique et plus rapide ; les petits cristaux de phosphate de fer contribuent à un meilleur accrochage des revêtements ultérieurs.

— *La ciférisation des aciers* qui est obtenue par dépôt au pistolet d'un mélange d'undécilénate de cuivre et d'acide undécilénique après chauffage à 300 °C ; il y a formation d'undécilénate de fer et polymérisation de la couche protectrice.

— *La protalisation des alliages légers :* Les sels supérieurs de certains métaux (V, Mo, W, Ti, Ni, Mn, Cr) donnent avec les métaux alcalins des sels solubles dans les solutions de carbonates alcalins. La réaction entre l'aluminium et la solution alcaline provoque l'apparition d'hydrogène qui réduit l'oxyde ; l'oxyde inférieur insoluble se dépose sur la pièce, et forme une couche protectrice adhérente.

— *Le mordançage des alliages ultra-légers* qui consiste à plonger les pièces dans un mélange de chromate de potassium et d'acide nitrique.

2.2.6. Dépôt de produits divers. — Les *peintures* contiennent un pigment pouvant éventuellement jouer le rôle de protection anodique (Zn, oxyde de zinc, minium de plomb) une huile siccative, un siccatif et un solvant. Après évaporation du solvant, le siccatif catalyse l'oxydation de l'huile et en provoque la polymérisation. L'application peut se faire à la brosse, au pistolet, au trempé.

D'autres types de peinture et de vernis sont utilisés : résines synthétiques, peintures cellulosiques, etc.

Les *matières plastiques* peuvent être utilisées soit en solution, soit par shoopage ou lit fluidisé lorsqu'elles sont thermoplastiques. Les émaux, brais et goudrons, silicates sont des produits couramment employés.

PLASTIQUES

GÉNÉRALITÉS

Les matières plastiques sont des composés macromoléculaires presque totalement produits par synthèse chimique. La consommation annuelle de plastiques en France, en 1972, est supérieure à 2 100 000 tonnes, le taux de croissance actuel est voisin de 20 % par an. Si l'on tente d'extrapoler la courbe de la consommation mondiale annuelle, on constate qu'elle dépassera en volume celle de l'acier peu de temps après 1980.

Les plastiques intéressent directement trois groupes professionnels séparés sur le plan technique et comprenant :

— les industries productrices qui les fabriquent et appartiennent à la grande industrie chimique ;

— les constructeurs de machines, qui mettent au point et construisent les matériels permettant de les mettre en œuvre ;

— les transformateurs, qui utilisent les produits des premiers et les machines des seconds, pour fournir aux industries utilisatrices des demi-produits et des objets en plastiques.

Les producteurs se chargent de plus en plus souvent dans leurs filiales de la mise en œuvre des semi-produits et les utilisateurs importants (électrotechnique, automobile, aéronautique), s'équipent pour assurer la mise en œuvre des plastiques dans leurs ateliers. L'emploi des plastiques s'est généralisé dans tous les domaines de la vie industrielle ou domestique et il est difficile à un constructeur soucieux d'efficacité et de rentabilité de les ignorer.

CHAPITRE PREMIER

COMPOSÉS MACROMOLÉCULAIRES PRÉPARATION. STRUCTURE FORCES DE COHÉSION

1. PRÉPARATION

Les matières plastiques sont fabriquées à partir de résines, qui sont presque toujours préparées, par synthèse chimique, à partir de dérivés de la houille ou du pétrole. On y ajoute souvent des **adjuvants,** destinés à modifier leurs caractéristiques : souplesse, résistance mécanique, tenue en présence d'oxygène, coloration, prix, etc. Ces adjuvants peuvent également être utilisés pour faciliter leur mise en œuvre. De toute façon, ces modifications sont le fait de l'industrie chimique et très rarement celui de l'industrie de la transformation ou **plasturgie.** Il en est tout autrement dans les ateliers qui mettent en œuvre les élastomères.

Les résines employées sont chimiquement très différentes mais elles ont un point commun : elles sont constituées de molécules géantes, appelées aussi **macromolécules.** En considérant la structure, les forces de cohésion et les méthodes de mise en œuvre des différentes résines, nous sommes amenés à considérer deux sortes de macromolécules. En effet, nous allons voir que les réactions chimiques peuvent, en fonction des produits dont on est parti et des réactions mises en jeu, conduire à des macromolécules *linéaires* ou à des macromolécules *tridimensionnelles.*

1.1. Préparation des composés macromoléculaires linéaires. — Les **matières thermoplastiques** ou **thermoplastes** ou **plastomères** sont des composés macromoléculaires linéaires ; ils sont préparés par polymérisation, copolymérisation et polycondensation.

1.1.1. Polymérisation. — Certaines molécules appelées **monomères,** peuvent s'associer bout à bout sous l'action de la chaleur, du rayonnement ultraviolet ou de catalyseurs (que l'on appelle plus justement « amorceurs ») qui sont le plus souvent des peroxydes. Cette association peut aussi se produire naturellement, sans action extérieure, mais il faut un temps beaucoup plus long (cela explique que la conservation prolongée de certains monomères soit difficile).

Par exemple, p monomères vinyliques $\underset{H}{\overset{H}{C}} = \underset{R}{\overset{H}{C}}$ conduisent à

la réaction : $p \; \underset{H}{\overset{H}{C}} = \underset{R}{\overset{H}{C}} \longrightarrow \left| -\underset{H}{\overset{H}{C}} - \underset{R}{\overset{H}{C}} - \right|_p$

p est l'*indice de polymérisation* ou *degré de polymérisation* ou *ordre du polymère*.

Le produit résultant est un **polymère** encore appelé **isopolymère** ou **homopolymère.** La réaction peut se produire grâce à l'instabilité de la double liaison vinylique.

La première liaison est une liaison covalencielle, correspondant à la mise en commun de deux électrons σ, cette liaison dite homopolaire est très stable (fig. I-1).

La deuxième est constituée par deux électrons π qui restent disponibles sur les atomes de carbone insaturés.

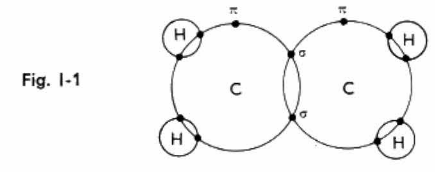


Fig. I-1

On écrit habituellement les formes mésomères ou résonantes de la double liaison de la façon suivante :

$$>C = C< \longleftrightarrow >\overset{\oplus}{C} - \overset{\ominus}{C}< \longleftrightarrow >\overset{\ominus}{C} - \overset{\oplus}{C}<$$

pour symboliser la tendance de ces associations à adopter une distribution intermédiaire entre plusieurs structures électroniques limites. Cette polarisation est mise à profit dans la polymérisation ionique.

Il suffit d'une activation de la double liaison pour qu'une molécule s'associe avec la molécule voisine, en mettant en commun les deux électrons disponibles respectivement sur un atome carbone d'une molécule et sur l'atome de carbone de la molécule voisine.

La molécule résultant de la polymérisation du monomère vinylique sera appelée par la plupart des auteurs « poly » suivi du nom chimique du monomère. Le tableau suivant rassemble les désignations de monomères et de polymères lorsque dans le monomère vinylique ci-dessus on remplace R par les groupements figurant dans la première colonne de ce tableau.

R	Monomères	Polymères
H	Éthylène	Polyéthylène
Cl	Chlorure de vinyle	Polychlorure de vinyle (1)
C_6H_5	Styrène	Polystyrène
OH	Alcool vinylique	Polyalcool vinylique (2)
CH_3	Propylène	Polypropylène
CN	Acrylonitrile	Polyacrylonitrile
COOH	Acide acrylique	Polyacide acrylique
$COOCH_3$	Acrylate de méthyle	Polyacrylate de méthyle

(1) D'autres noms sont couramment employés : « chlorure de polyvinyle » ; l'anglais « polyvinylchloride » est quelquefois traduit « polyvinylchlorure » et les abréviations résultantes « PCV, PVC, CPV » se rencontrent.

(2) Même remarque : le polyalcool vinylique est également appelé « alcool polyvinylique ».

Le tableau suivant donne d'autres monomères qui peuvent réagir de façon identique.

Monomères		Polymères
$\underset{H}{\overset{H}{C}} = \underset{Cl}{\overset{Cl}{C}}$	Chlorure de vinylidène	Polychlorure de vinylidène
$\underset{H}{\overset{H}{C}} = \underset{COOCH_3}{\overset{CH_3}{C}}$	Méthacrylate de méthyle	Polyméthacrylate de méthyle
$\underset{F}{\overset{F}{C}} = \underset{F}{\overset{F}{C}}$	Tétrafluoréthylène	Polytétrafluoréthylène
$\underset{F}{\overset{F}{C}} = \underset{Cl}{\overset{F}{C}}$	Monochloro-trifluoréthylène	Polymonochlorotrifluoréthylène

Nous pourrions ajouter de très nombreux autres exemples de polymérisation, à partir du butadiène, de l'isobutylène, du tétrasulfure d'éthylène, qui conduisent à des polymères qui nous intéressent moins car ce sont des élastomères.

Nous citerons tout de même un dernier cas, celui de la polymérisation par ouverture d'un cycle comme pour la caprolactame.

$$p \; \left[\text{cycle : } CH_2 - CO - NH - CH_2 - CH_2 - H_2C - H_2C\right] \longrightarrow [-(CH_2)_5\, CONH-]\, p$$

Le polymère est un polyamide, baptisé polyamide 6, parce qu'il y a 6 atomes de carbone dans la molécule initiale.

D'une façon générale, la polymérisation peut se faire en **masse,** en **solution,** en **suspension** ou en **émulsion.**

1° *Polymérisation en masse.* — Le catalyseur est ajouté au monomère liquide ; deux cas peuvent se présenter :

a) le polymère est soluble dans le monomère : le liquide devient de plus en plus visqueux ;

b) le polymère est insoluble : il précipite mais le monomère reste absorbé.

Cette méthode est peu employée pour la fabrication de grandes quantités de polymères, on l'utilise néanmoins pour la fabrication de plaques ou de blocs de polyméthylméthacrylate (ce corps est soluble dans le monomère).

2° *Polymérisation en solution.* — Le monomère est en solution dans une grande quantité de solvant, qu'il faut ensuite évaporer. Cette méthode est peu employée.

3° *Polymérisation en suspension ou en perles.* — Le monomère catalysé est dispersé dans une solution aqueuse par agitation énergique ; il se fragmente en sphères de 0,1 à 3 mm de diamètre. Contrairement à la première méthode, la chaleur de réaction peut aisément être évacuée.

On doit ajouter des stabilisateurs de suspension (talc, alumine, bentonite) pour empêcher les particules de s'agglomérer ; le lavage des perles permet d'éliminer les produits inutiles et on obtient un produit très pur.

4° *Polymérisation en émulsion.* — L'utilisation d'agents émulsionnants : savons, acides gras sulfonés, conduit à une émulsion de particules plus petites que dans le cas précédent. On polymérise à l'aide d'un catalyseur

soluble dans l'eau. Par ce procédé on obtient des produits de masse moléculaire plus grande mais les agents émulsionnants sont très difficilement éliminés.

1.1.2. Copolymérisation. — Les macromolécules linéaires peuvent aussi être constituées par l'association de plusieurs séries de monomères distincts, le produit obtenu est un **copolymère,** appelé également, plus rarement, **hétéropolymère.** Le mécanisme réactionnel est le même que pour la polymérisation. À partir de deux monomères A et B, on prépare le copolymère :

ABAABBBBAB. . .

Au début d'une copolymérisation, le copolymère se forme avec une prédominance du monomère le plus réactif, A par exemple. Le mélange des monomères s'appauvrit en A et à la fin de la réaction, le copolymère formé est à prédominance B. **Les copolymères seront donc hétérogènes.**

Par ailleurs, nous avons vu que la copolymérisation des monomères A et B conduit sensiblement à une répartition due au hasard ; ces produits sont des **copolymères statistiques.** On a cherché à obtenir des copolymères comportant des séquences AAA — et BBB — alternées. Ces copolymères sont appelés **copolymères séquencés** ou **copolymères blocs.** De plus, on a essayé et on a réussi à obtenir des **copolymères greffés :**

```
A A A A A A A A A
  B     B
  B     B
  B     B
```

Une des méthodes d'obtention étudiée par Magat et Chapiro consiste à créer des centres actifs par l'action de rayonnements ionisants (α, β et γ).

En irradiant le monomère B et le polymère AAAA — on obtiendra en général l'homopolymère B et le polymère greffé.

On rencontre couramment les copolymères statistiques industriels obtenus à partir des monomères suivants :

- { acétate de vinyle / chlorure de vinyle
- { styrène / butadiène $CH_2 = CH - CH = CH_2$ (1)
- { chlorure de vinyle / chlorure de vinylidène
- { éthylène / propylène
- { acrylonitrile / styrène

1.1.3. Polycondensation. — La polycondensation correspond :

1° À l'association de molécules identiques portant deux fonctions susceptibles de réagir l'une sur l'autre avec élimination d'un résidu ; par exemple un amino-acide :

$$n\,[COOH - (CH_2)_{10} - NH_2] \rightarrow$$

$$HO\,OC - (CH_2)_{10} - NH\;H\;HO\,OC - (CH_2)_{10} - NH\;H$$

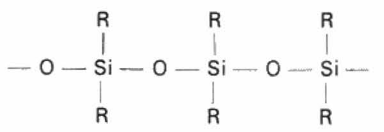
$$\rightarrow |-OC-(CH_2)_{10}-NH-|\,n + n\,H_2O$$

Ce produit qui est un **polycondensat** est le polyamide 11 (11 atomes de carbone dans la molécule initiale).

On a une association du même type avec les silanediol

```
     R               R               R
     |               |               |
H  O—Si— OH H  O— Si— OH H  O— Si— OH
     |               |               |
     R               R               R
```

qui conduisent à un silicone linéaire qui est également un polycondensat



2° À l'association de deux séries de molécules différentes portant respectivement deux fonctions susceptibles de réagir les unes sur les autres. Par exemple, l'hexaméthylène diamine $NH_2 - (CH_2)_6 - NH_2$ peut réagir sur l'hexanedioïque $COOH - (CH_2)_4 - COOH$

$$H\,HN - (CH_2)_6\,NH\;H\,HO\,OC - (CH_2)_4 - CO\,OH$$

le polycondensat qui est produit par cette réaction est le polyhexaméthylène-adipamide ou polyamide 6/6.

En partant de l'acide sébacique ou décanedioïque $COOH - (CH_2)_8 - COOH$, on obtiendrait par polycondensation avec l'hexaméthylène diamine, le polyamide 6/10.

Toutes ces méthodes conduisent dans tous les cas à des macromolécules linéaires.

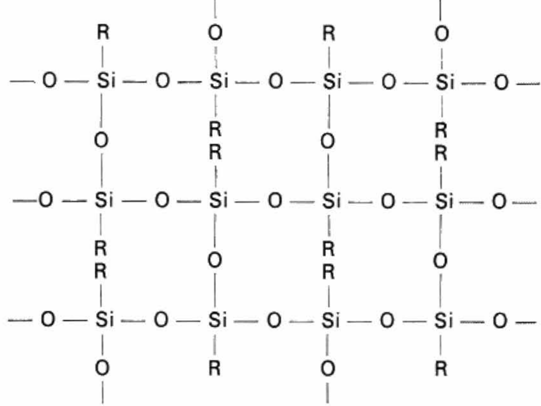
1.2. Préparation des composés macromoléculaires tridimensionnels. — On prépare la plupart des composés macromoléculaires tridimensionnels par polycondensation mais on peut également faire appel à des copolymérisations et à des polyadditions.

1.2.1. Polycondensation. — Des molécules bifonctionnelles peuvent réagir sur des molécules comportant plus de deux fonctions réactives. Il y a élimination d'eau et la réaction de polycondensation qui se produit se développe alors dans trois dimensions.

L'exemple des silanetriol a le mérite d'être simple :

```
        R
        |
OH — Si — OH
        |
        OH
```

et la réaction est la même que pour les silanediol. On obtient une macromolécule tridimensionnelle qui peut être schématisée de la façon suivante :



C'est un polycondensat.

Nous verrons plus loin que, de la même façon, il est possible de polycondenser avec élimination d'eau, d'une part le formaldéhyde, et, d'autre part, le phénol trifonctionnel en 1, 2, 3, l'urée trifonctionnelle, la mélamine hexafonctionnelle.

Les mécanismes de polycondensation conduisent souvent à des structures intermédiaires linéaires et, dans ce cas, les produits polycondensés possèdent provisoirement les propriétés des thermoplastiques. Ce sont des produits de ce type, appelés **thermodurcissables,** qui sont livrés par l'industrie chimique aux mouleurs. Ces produits contiennent des colorants, des charges, des lubrifiants internes et des catalyseurs et les mouleurs peuvent les mettre en forme à chaud par **compression,** par **transfert** et, depuis peu de temps, par **injection.** Cette opération de moulage permet à la réaction de polycondensation de se pour-

(1) Les polystyrènes-butadiène sont des copolymères statistiques mais on utilise aussi des mélanges de polystyrène-butadiène et de polystyrène qui sont des produits à deux phases que nous étudierons à part. Par ailleurs, il existe des copolymères séquencés et des copolymères greffés.

suivre et on obtient un objet insoluble et infusible, en matière **thermodurcie** ou **thermorigide.**

1.2.2. Autres procédés. — On peut obtenir également des structures tridimensionnelles en réticulant des polymères linéaires ou des prépolymères. Nous verrons que des produits tridimensionnels peuvent être obtenus par réticulation de polyesters linéaires comportant des liaisons insaturées (grâce à des ponts styrène) et que, par ailleurs, les époxydes peuvent être réticulés par des diamines par exemple.

2. CONFIGURATION DES MACROMOLÉCULES

2.1. Macromolécules tridimensionnelles. — La macromolécule est constituée par un ensemble d'atomes liés entre eux sans que l'on puisse constater une mise en ordre de type cristallin. Les limites de la molécule correspondent aux limites même de l'objet; toutefois à cause des empêchements stériques, il existe des zones où les réactions n'ont pas pu se produire. Dans les molécules tridimensionnelles obtenues par réticulation de molécules linéaires, on peut définir une grandeur appelée *indice de réseau* qui correspond au nombre de ponts entre chaînes pour cent atomes.

2.2. Macromolécules linéaires

2.2.1. Dimensions d'une macromolécule. — Les macromolécules linéaires, obtenues par polymérisation, copolymérisation et polycondensation, sont constituées par des atomes de carbone, d'oxygène, d'azote ou de silicium, liés les uns aux autres, pour former des molécules très longues par rapport à leurs dimensions transverses.

1° *Microgéométrie.* — Les distances entre atomes et les angles de valence sont parfaitement définis dans les macromolécules, comme ils le sont à l'intérieur des petites molécules.

Distances entre atomes identiques (en nanomètres) :

C = C : 0,128 ;
C — C : 0,154.

Distances entre atomes différents (en nanomètres) :

C = O : 0,143 ;
C — O : 0,146 (méthanol) ;
O — H : 0,102 (eau) ;
N — H : 0,102 (ammoniac) ;
C = N : 0,118 (nitrile) ;
C — Cl : 0,170 environ ;
C — H dans l'éthane : 0,1093 ;
C — H dans l'éthylène : 0,1087 ;
C — H dans le benzène : 0,1087 ;
C — H dans l'acétylène : 0,1058.

Angles de valence :

— C — 109° 28′ dans une chaîne polyoléfinique ;
— O — 105° dans l'eau ;
— O — 128° dans l'oxyde de diphényle ;
— O — 111° dans l'oxyde de diméthyle ;
— S — 113° dans le sulfure de diphényle.

Les angles de valence du carbone dépendent des substituants. L'angle Cl — C — Cl est égal à 115°, 112° ou 109° 28′ suivant qu'il s'agit du dichlorométhane, du trichlorométhane ou du tétrachlorure de carbone.

2° *Macrogéométrie.* — Les macromolécules peuvent atteindre et même dépasser un micromètre de long, pour quelques nanomètres de large, cela justifie leur nom de chaînes (fig. I-1).

Dans celle-ci les atomes de carbone sont disposés de façon que si C_1 et C_2 sont deux atomes de carbone voisins, un troisième atome de carbone C_3 se trouve à une distance de 0,154 nm de C_2 sur un cône de sommet C_2 et d'axe C_1C_2, dont le demi-angle au sommet est de 70° 32′ (fig. I-2). Par suite, une chaîne aura l'allure d'une ligne brisée, avec une infinité de configurations possibles, dont on ne pourra définir que les dimensions moyennes. La grandeur la plus simple à calculer est l'écart r entre les extrémités de la chaîne ; toutefois, la plupart des calculs théoriques concernant les propriétés optiques ou hydrodynamiques

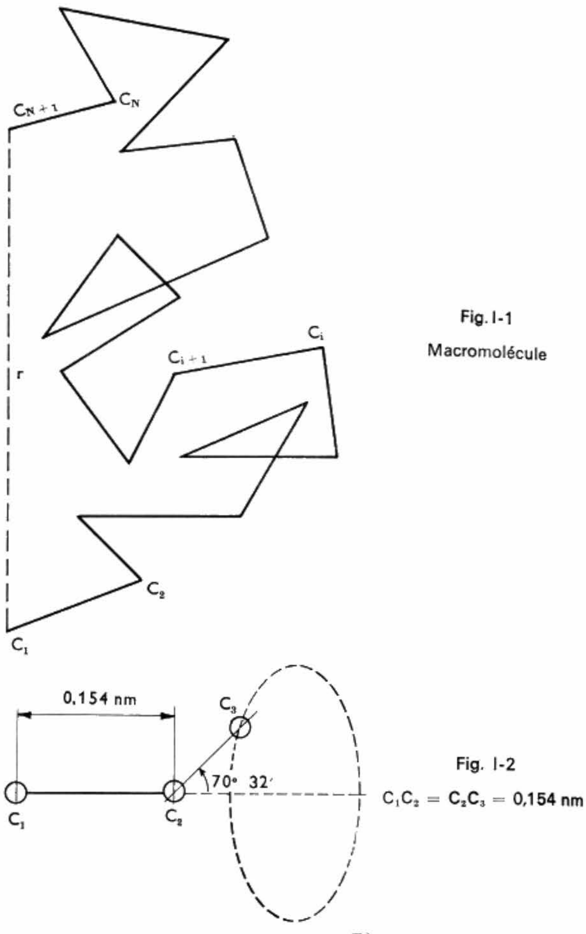


Fig. I-1
Macromolécule

Fig. I-2
$C_1C_2 = C_2C_3 = 0,154$ nm

utilisent l'écart quadratique moyen $\overline{r^2}$. On utilise également le carré moyen du rayon de giration de la chaîne. En appelant ρ_i la distance qui sépare le centre de gravité d'une chaîne et les atomes de celle-ci, le carré du rayon de giration est donné par la relation suivante :

$$\rho^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\rho^2_i}$$

(N désignant le nombre d'atomes de la chaîne).

Position préférentielle des atomes de carbone de la chaîne :

En considérant un atome de carbone quelconque à l'intérieur de la chaîne, nous avons laissé entendre que sa position est indifférente sur le cercle que nous avons défini sur le cône de valence. En réalité, on trouve trois positions préférentielles :

— une position « trans » dans le plan des deux liaisons précédentes ;

— deux positions « gauche » à 120° par rapport à la position « trans ».

Les minimums d'énergie potentielle liés respectivement aux configurations trans et gauche sont séparés par des barrières d'énergie plus ou moins élevées et variables en fonction de l'angle de rotation (fig. I-3).

Debye, Bresler, Frenckel et Sadron se sont intéressés à ce problème et à celui des interactions entre chaînons voisins. De nombreuses autres études ont été poursuivies par Kuhn et Markov, définissant les probabilités pour une chaîne, dont une extrémité coïncide avec l'origine d'un système d'axes trirectangulaire, d'avoir sa deuxième extrémité dans un élément de volume ($dx\ dy\ dz$) ou d'être située entre deux sphères de rayon r et $r + dr$. On voit alors que la distribution des écarts entre les extrémités correspond à une distribution de Gauss ; c'est pourquoi ces chaînes à rotation interne libre sont quelquefois appelées **chaînes gaussiennes.**

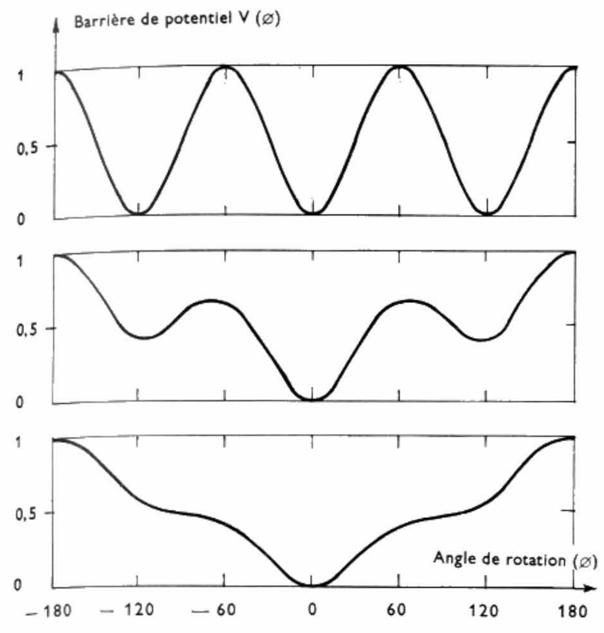


Fig. I-3 — Énergie potentielle associée à la rotation d'une liaison en fonction de l'angle

D'autres études concernent la répartition statistique des directions des éléments de chaîne et la détermination de la forme et du volume d'encombrement de la molécule. Ces considérations paraissent un peu hasardeuses mais elles ont servi de support à des études fructueuses, en particulier à des études viscosimétriques et de diffusion de la lumière ou de biréfringence d'écoulement.

Certaines macromolécules linéaires comportent des doubles liaisons ou des cycles à l'intérieur de la chaîne qui interdisent la rotation libre, ce sont des **chaînes non gaussiennes.**

D'autres notions peuvent être considérées avec intérêt, nous allons les examiner maintenant.

2.2.2. Caractéristiques moléculaires

1° *Définition.* — Nous avons vu que le schéma de la polymérisation était :

$$P(A) \rightarrow (A)_P$$

A correspondant à une molécule monomère ;
P étant l'indice de polymérisation.

La définition peut être facilement transposée à un polycondensat. Dans un composé macromoléculaire tous les degrés de polymérisation ne sont pas identiques. Dans 1 g de polymérisat il y a m_P gramme de composé d'ordre *P* ; m_P est une fonction de *P* :

$$m_P = H\ (P)$$

La courbe représentative de cette fonction est la caractéristique moléculaire pondérale du mélange ou en abrégé *C.M.p.*

De la même façon, soit n_P le nombre de molécules d'ordre *P* présentes dans un polymérisat de masse égale à la masse moléculaire du monomère, soit M_B ; n_P est aussi une fonction de *P* : $n_P = h\ (P)$.

La courbe représentative de la fonction *h* (*P*) est une caractéristique moléculaire numérale (*C.M.n.*).

La masse moléculaire du polymère d'ordre *P* étant égale à :

$$M = M_B . P$$

il vient :

$$n_P = \frac{m_P}{P} \text{ ou encore : } h\ (P) = \frac{H\ (P)}{P} \text{ ou : } n_P = m_P \frac{M_B}{M}$$

Les caractéristiques moléculaires ont des allures qui peuvent être assez différentes (fig. I-4).

Valeurs moyennes de P et de M :

Le degré moyen de polymérisation $\overline{P}$ sera défini comme étant égal à $\frac{1}{n}$.

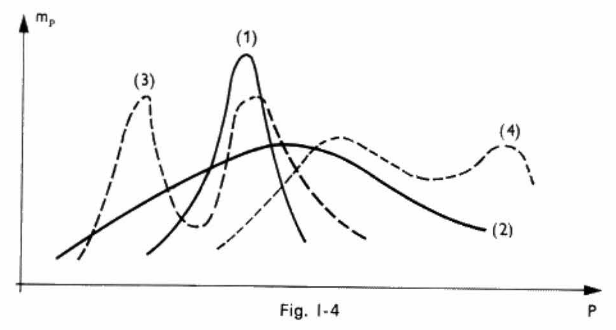


Fig. I-4

1. Homodispersé (isomoléculaire) ; CM aiguë
2. Polydispersé (polymoléculaire) ; CM étalée
3. Courbe aiguë à plusieurs maximums
4. Courbe étalée à plusieurs maximums

De la même façon, nous définirons une masse moléculaire moyenne $\overline{M} = \overline{P} . M_B$.

2° *Méthode de détermination des C.M.* — La plupart des méthodes de détermination des *C.M.* sont fondées sur le fractionnement d'une solution du composé macromoléculaire. Ce fractionnement est en général obtenu grâce aux différences de solubilité (celle-ci est fonction de la masse moléculaire). On applique trois méthodes générales :

a) *Précipitation fractionnée.* — On précipite les parties dont les masses moléculaires sont les plus grandes :
— par addition progressive d'un non solvant à la solution ;
— par abaissement progressif de la température de la solution obtenue à partir d'un mélange solvant-non solvant.

b) *Coacervation.* — L'addition graduée d'un non solvant à la solution de la substance à fractionner conduit quelquefois à une séparation par coacervation, c'est-à-dire à la formation de deux couches liquides.

c) *Extraction.* — L'échantillon est dissout dans un mélange de solvants de pouvoir solvant croissant (par exemple, en augmentant la température du mélange solvant-non solvant dans lequel s'opère la dissolution).

De cette façon on obtient des solutions de composés macromoléculaires que l'on peut considérer comme étant « homodispersés ». On détermine ensuite, sur chaque fraction, la masse moléculaire moyenne, en faisant appel à des méthodes osmotique, viscosimétrique, cryoscopique, de diffusion de la lumière, de dosage des groupements terminaux ou d'ultracentrifugation.

2.2.3. Régularité. Irrégularité. — Nous avons considéré jusqu'à maintenant la géométrie des macromolécules, la répartition statistique des longueurs de chaînes dans le composé macromoléculaire, mais nous avons négligé la configuration des atomes latéraux et en particulier des atomes ou groupements substitués.

Nous allons voir que cette répartition peut être parfaitement régulière ou tout à fait irrégulière. Dans le premier cas, les molécules peuvent s'insérer dans une zone d'ordre cristallin, dans le second, la résine sera amorphe.

1° *Monomère symétrique.* — Par exemple : l'éthylène $CH_2 = CH_2$ ou le tétrafluoréthylène $CF_2 = CF_2$; le polymère est régulier :

$$— CH_2 — CH_2 — CH_2 — CH_2 \ldots$$

ou

$$— CF_2 — CF_2 — CF_2 — CF_2 \ldots$$

Par ailleurs, la configuration trans correspond à l'énergie la plus basse et la chaîne a la forme d'un zigzag plan représenté par le schéma ci-après ; les atomes de carbone ont été placés dans le plan et les atomes d'hydrogène (représentés par une croix unique entourée d'un cercle), ont été placés l'un au-dessus, l'autre au-dessous du plan.

```
        ⊕       ⊕
        C       C
   \  /   \   /   \
    C       C
    ⊕       ⊕
```

Pour le polytétrafluoréthylène, on a exactement la même configuration mais la forme plane est instable ; à cause d'empêchements stériques, la chaîne s'enroule en hélice, avec 13 ou 15 atomes de carbone par tour (V. chap. 4).

2° *Monomères dissymétriques.*

a) *Monomères du type* $CH_2 = CR_2$. — Par exemple : chlorure de vinylidène, fluorure de vinylidène, polyisobutylène.

Nous pouvons envisager les associations :

$— CH_2 — CR_2 — CH_2 — CR_2 — CH_2 — CR_2 —$

ou :

$— CH_2 — CR_2 — CR_2 — CH_2 — CH_2 — CR_2 — CR_2 — CH_2 —$

ou encore, une répartition au hasard, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Les deux premières formes seraient régulières, la troisième ne le serait pas. En réalité, la polymérisation conduit à la première forme. La chaîne a une configuration trans.

b) *Monomères du type* $CH_2 = CHR$. — Par exemple : styrène, chlorure de vinyle, acétate de vinyle, propylène. Les possibilités d'arrangement sont les mêmes que celles que nous venons de voir et là aussi, la polymérisation est régulière.

$— CH_2 — CHR — CH_2 — CHR — CH_2 — CHR —$

Il est aussi possible d'avoir :

[schéma : chaînes C—C avec groupements + + ou + —, atomes ⊕]

+ : Groupement substitué au-dessus du plan

— : Groupement substitué au-dessous du plan.

⊕ : Atome d'hydrogène.

Natta et Ziegler, à qui on a décerné un prix Nobel, ont introduit une nouvelle terminologie pour désigner ces configurations.

La première est appelée **isotactique** et la seconde, **syndiotactique ;** lorsqu'il y a répartition statistique de part et d'autre du plan de l'élément dissymétrique la configuration est dite **atactique.**

Il est aussi possible d'obtenir des **« polymères bloc »** c'est-à-dire des macromolécules dans lesquels on a des tronçons isotactiques, des tronçons atactiques et des tronçons syndiotactiques. Les méthodes de polymérisation classiques conduisent à des polymères atactiques, le PCV semble conduire à des polymères en grande partie syndiotactiques.

Ces travaux, qui ont valu aux deux chercheurs leur prix Nobel, concernent les méthodes de catalyse stéréospécifiques, conduisant, à partir d'un monomère dissymétrique vinylique, à un polymère stéréorégulier en grande partie isotactique. Bunn a montré que ces derniers s'intègrent dans les zones cristallines, sous forme d'une hélice, qui s'enroule à cause des alternances trans et gauche (la forme gauche étant toujours définie dans le même sens) ; l'hélice possède 6 atomes de carbone par pas (fig. I-5).

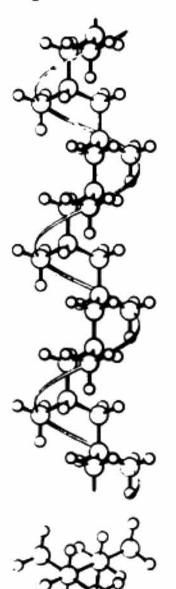


Fig. I-5

Configuration des chaînes de polypropylène isotactique cristallin

La configuration gauche est due à la présence du groupement CH_3.

3° *Polycondensation.* — Nous avons vu quel était le mécanisme réactionnel de la polycondensation, il conduit naturellement à des chaînes régulières susceptibles de cristalliser (polyesters, polyamides).

4° *Copolymérisation.* — Elle conduit à des macromolécules, dont la régularité dépend de la nature des monomères constitutifs et de leur importance relative dans le copolymère.

Par exemple, le fluorure de vinylidène et le monochlorotrifluoréthylène conduisent respectivement à des polymères fortement cristallins.

$[— CH_2 — CF_2 —]_n$ et $[— CF_2 — CF(Cl) —]_n$

Le copolymère, dans lequel ces deux monomères se trouvent sensiblement en parties égales est complètement amorphe et caoutchoutique à la température ambiante.

S'il y a nette prédominance de l'un des deux monomères, le copolymère est cristallin mais il l'est moins que l'homopolymère correspondant au monomère qui se trouve en plus grande quantité dans le copolymère. De plus la température de fusion du copolymère est plus basse. Nous verrons plus loin qu'il est possible d'établir une relation entre la température de fusion d'un copolymère et les paramètres liés à sa constitution.

2.2.4. Cristallinité. Sphérulites

1° *Conditions de cristallisation.*

a) *Stéréorégularité.* — Pour qu'il y ait organisation cristalline, il faut que le polymère soit régulier et que, de plus, dans le cas des monomères dissymétriques, il soit isotactique ou syndiotactique.

b) Les forces d'attraction entre chaînes doivent vaincre l'agitation thermique statistique et permettre la mise en ordre. Dans le polyisobutylène, par exemple, on n'obtient une cristallisation que lorsqu'on étire le polymère.

c) *Empêchements stériques.* — L'existence de ponts entre chaînes (réticulation des polyéthylènes à l'aide de peroxyde de dicumyle ou sous l'action d'un rayonnement ionisant) ou de ramifications « Branching » n'est pas en soi une cause suffisante pour empêcher une mise en ordre cristalline mais elle tend à diminuer les possibilités de cristallisation. Le polyéthylène de basse densité par exemple, qui est en général très ramifié, est beaucoup moins cristallin que le polyéthylène de haute densité.

d) Par ailleurs, les macromolécules dans lesquelles le motif élémentaire est long, cristallisent moins facilement ; c'est le cas des polyamides par exemple.

e) On peut admettre que les polymères ou copolymères, en grande partie atactiques, contiennent des séquences iso- ou syndiotactiques, qui peuvent s'intégrer dans des microcristallites.

f) Limites de cristallinité trouvées dans différents polymères cristallins :

Polyamide 6-6	50 %
Polyéthylène de basse densité	30 à 60 %
Polyéthylène de haute densité	80 %
Polyoxyméthylène	95 %
Polytétrafluoréthylène	87 %
Polymonochlorotrifluoréthylène	90 %
Chlorure de polyvinylidène	75 %
Polyéthylène téréphtalate	60 %

2° *Vitesse de cristallisation.* — Le processus de cristallisation est étroitement dépendant du temps et de la température.

La vitesse de formation des centres de cristallisation dépend de la température du polymère ; elle varie de façon continue entre la température de fusion et la température dite de transition du second ordre ou température de transition vitreuse T_v (Glass temperature *Tg*, Einfriere temperature), dont nous reparlerons.

La vitesse de formation des centres de cristallinité varie avec la température ; elle présente un maximum entre

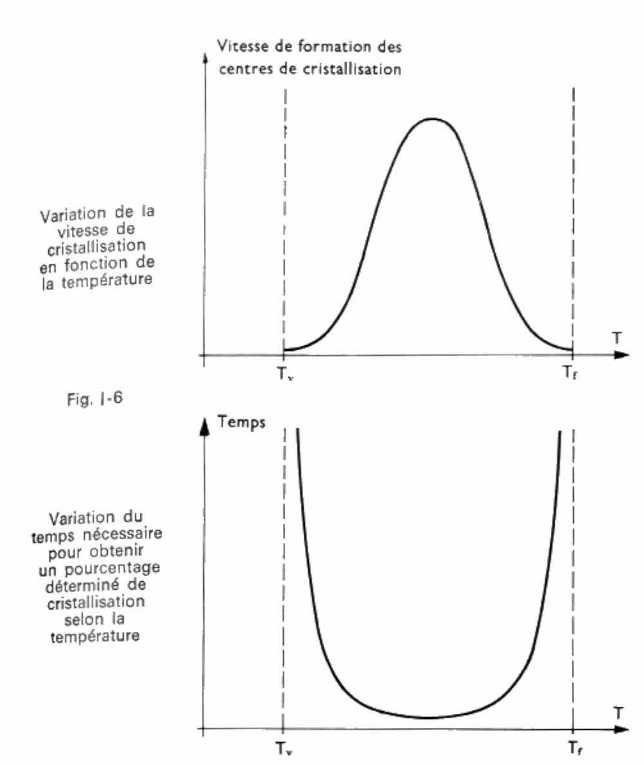


Fig. I-6

T_v et T_f, la température de fusion (fig. I-6). Au voisinage de T_v la mobilité moléculaire est trop faible pour permettre les déplacements nécessaires à la mise en ordre; au voisinage de T_f, l'agitation thermique est trop grande pour que les cristallites puissent facilement se former. Il en résulte que le temps nécessaire pour obtenir un certain pourcentage de cristallinité croît considérablement au voisinage de T_v et T_f.

3° *Morphologie des cristallites.* — Quand les conditions que nous avons énumérées sont réunies, il y a formation de zones d'ordre appelées *cristallites*, qui sont petites par rapport à la longueur de la chaîne.

En 1947, des chercheurs comme Mark, Hormann, Abitz, Kratky avaient proposé une structure cristalline, qui tenait compte des dimensions relatives cristallite-chaîne. Depuis 1963, des études consacrées aux cristallisations à partir de solutions, ont incité les chercheurs à admettre que des cristallites lamellaires peuvent être obtenus à partir soit de solutions, soit de polymères fondus. Dans chaque lamelle, se produirait un repliement de la chaîne (fig. I-7).

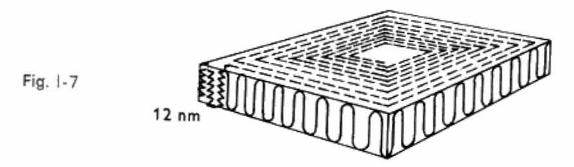


Fig. I-7

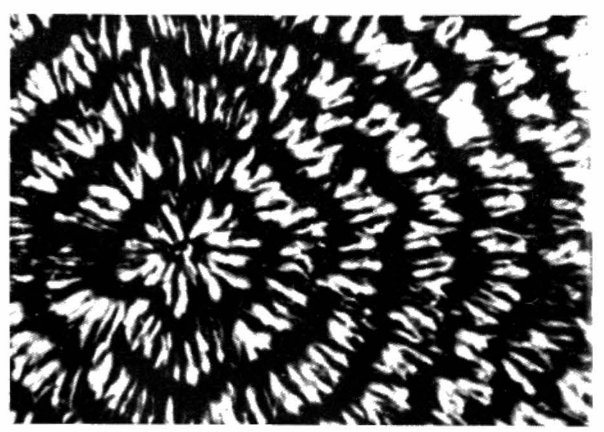
De toute façon, sans entrer dans les détails de constitution des cristallites, sans préciser les formes cristallines (cubique à faces centrées, hexagonale, triclinique, rhomboédrique, etc.), que l'on attribue aux différents polymères, on doit admettre un certain nombre de résultats:

— des zones d'ordre et de désordre coexistent;

— l'importance des zones cristallines et celles des zones amorphes est très variable d'un polymère à un autre;

— l'imbrication zone amorphe-cristallite est probable pour les matériaux peu cristallins alors que pour les polymères très cristallins les zones cristallisées peuvent atteindre des dimensions importantes;

— un refroidissement brutal ou « trempe » à partir du polymère fondu conduit à un polymère à cristallisation fine. En revanche, un refroidissement lent ou un « recuit » prolongé conduit à des cristallites de dimensions importantes.



Photomicrographie de croissance sphérulitique

4° *Sphérulites.* — Par des refroidissements très lents, les polymères très cristallins peuvent conduire à des organisations cristallines de grande dimension, dans lesquelles les cristallites prennent place; on les appelle sphérulites. Certains sphérulites sont assez gros pour que l'on puisse les voir à l'œil nu entre nicolls croisés. Ces sphérulites sont polyédriques ou sont délimités par des surfaces planes et des hyperboloïdes. Ces surfaces planes délimitent des croissances cristallines issues en même temps de deux centres voisins et progressant à la même vitesse.

Les surfaces hyperboliques correspondent à des nucléations se produisant à des temps différents. Les surfaces de séparation entre sphérulites et les plans diamétraux des sphérulites, sont des plans de fragilité mécanique et de vulnérabilité à la corrosion. En général on cherche à obtenir des croissances sphérulitiques pour la fabrication de surfaces frottantes et une cristallisation fine pour des pièces résistant au choc.

5° *Pourcentage de cristallinité.* — Il peut être mesuré par des méthodes calorimétriques, par diffraction de rayons X, par densimétrie ou par spectrographie avec infrarouges:

a) *Calorimétrie.* — Peu employée, cette méthode est fondée sur la connaissance de la chaleur de fusion du composé macromoléculaire parfaitement cristallisé.

b) *Diffraction des rayons X.* — On utilise le fait que des régions cristallines donnent des diffractions maximales aiguës tandis que les polymères amorphes donnent seulement des halos diffus. En principe cette méthode permet de déterminer les distances entre les plans réticulaires. La dimension minimale des cristallites que l'on peut déceler est 5 nanomètres; on peut les mesurer jusqu'à 50 nanomètres.

c) *Densimétrie.* — La méthode qui paraît la plus intéressante est la densimétrie, qui consiste à définir la masse volumique ρ_c du polymère parfaitement cristallin à partir des dimensions de la maille cristalline, déterminée par diffraction d'un rayonnement X.

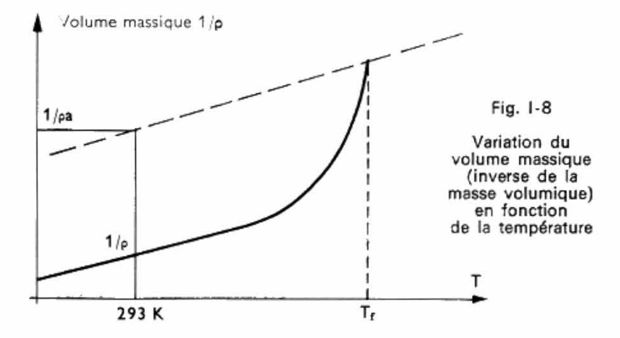


Fig. I-8

On définit la masse volumique ρ_a du polymère parfaitement amorphe par extrapolation à partir de la courbe de dilatométrie cubique (fig. I-8). Puis, à partir d'un petit

échantillon du polymère, on détermine la masse volumique ρ et le pourcentage de cristallinité est alors égal à :

$$c = \frac{\rho_c}{\rho}\left(\frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a}\right) \times 100$$

À titre indicatif, voici quelques masses volumiques de polymères à la température ambiante.

	ρ_c	ρ_a
Polyéthylène	1,014	0,85
PP	0,936	0,85
PCV	1,44	1,39
Polyéthylène téréphtalate	1,455	1,335

3. FORCES DE COHÉSION

3.1. Composés macromoléculaires tridimensionnels. — Les forces qui s'opposent à la déformation de l'ensemble moléculaire sont des forces covalentes, qui mettent en jeu des énergies voisines de 100 à 200 kilocalories entre atomes et qui résultent de la mise en commun d'électrons. Ces liaisons chimiques sont peu affectées par la température et très stables chimiquement.

3.2. Composés macromoléculaires linéaires

3.2.1. Forces intramoléculaires. — La solidité du squelette de la chaîne est assurée par des forces covalentes du même type que celles qui existent dans les macromolécules tridimensionnelles. La déformation de l'ensemble constitué par toutes les molécules enchevêtrées dépend davantage des effets intermoléculaires que des forces intramoléculaires.

3.2.2. Forces intermoléculaires. — Trois sortes de forces intermoléculaires, aux effets cumulatifs, agissent à petite distance; leur intensité est inversement proportionnelle à la puissance septième de la distance intermoléculaire. Ces trois formes correspondent à des effets d'orientation, d'induction ou de dispersion, qui sont liés aux moments polaires existants dans les molécules ou engendrés par induction dans les molécules voisines.

Le polyéthylène est une macromolécule non polaire; les liaisons intermoléculaires sont assurées par des forces de dispersion. Lorsque la chaîne comporte des atomes substitués de chlore, par exemple comme dans le PVC, on a alors, en plus, des forces d'induction et d'orientation. Par ailleurs, entre certaines macromolécules peuvent s'établir des liaisons hydrogène plus énergiques; elles confèrent sa ténacité au nylon (V. ci-après).

Liaison hydrogène. — Des liaisons qui ne sont ni des liaisons covalentes, ni des liaisons électromagnétiques peuvent s'établir à l'intérieur des molécules ou entre des molécules voisines, identiques ou non.

Ces liaisons appelées « liaisons hydrogène » se forment entre l'hydrogène (hydrogène d'une molécule lié par liaison covalente) et un atome fortement électronégatif d'une molécule voisine. Cette liaison a un caractère électrostatique; l'énergie de liaison est comprise entre 5 et 10 kcal.mole^{-1}. On peut s'attendre à ce que le fluor, l'oxygène, l'azote et le chlore, permettent cette association avec une aptitude décroissante dans l'ordre indiqué.

Plusieurs exemples de macromolécules entre lesquelles s'établissent des liaisons hydrogène peuvent être cités.

Dans la cellulose, qui correspond à une macromolécule naturelle, les groupements oxhydriles donnent lieu à des liaisons hydrogène.

—O(H)(H)O— | —O(H)(H)O—

Il en est de même, entre les groupements amides de la soie naturelle ou des polyamides :

NH
N — H . . . O = C
NH . . . O = C
O = C

4. PRINCIPAUX PLASTIQUES COMMERCIALISÉS

4.1. Composés linéaires

4.1.1. Amorphes

1° *Cellulosiques :*	*Abréviations Normalisées* (1)
Acétate de cellulose	CA
Propionate de cellulose	CP
Acétobutyrate de cellulose	CAB
Acétopropionate de cellulose	CAP
Carboxyméthylcellulose	CMC
Éthylcellulose	EC
Nitrate de cellulose	CN
2° *Vinyliques :*	
Polychlorure de vinyle	PCV
Polyacétate de vinyle	PVAC
Polychloroacétate de vinyle	PVCAC
Polystyrène	PS
Polyacrylonitrile	PAN
Polystyrène acrylonitrile	SAN
Polystyrène butadiène	SB (2)
Polystyrène butadiène acrylonitrile	ABS
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA
Poly (butyral de vinyle)	PVB

4.1.2. Partiellement cristallins

1° *Vinyliques :*	
Polychlorure de vinylidène	PVDC
Polyéthylène	PE
Polypropylène	PP
Polyoxyméthylène	POM
Polyéthylène téréphtalate	PETP
Polytétrafluoréthylène	PTFE
Polychlorotrifluoréthylène	PCTFE
Polyalcool vinylique	PVAL
2° *Polyamides*	PA

(1) D'après la recommandation ISO R 1043, 1re édition, avril 1969.
(2) Nous verrons que les polystyrènes choc, qui sont généralement des mélanges à deux phases PS-PS-Bu, peuvent être aussi des copolymères séquencés : styrène-butadiène.

4.2. Composés tridimensionnels thermorigides

		Désignation de la Marque de Qualité PF (Plastiques Français)
Mélamine formol	MF	Am
Phénol formol	PF	P
Urée formol	UF	Au
Polyesters	UP *	
Polydiallylphtalate	PDAP	
Époxydes	EP	
Polyuréthanne	PUR	
Silicones	SI	
Crésols formol	CF	PC

* unsaturated polyester

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, MÉCANIQUES ET CHIMIQUES DES COMPOSÉS MACROMOLÉCULAIRES EN RELATION AVEC LEUR STRUCTURE

Malgré les différences de nature chimique des macromolécules, nous sommes en droit de nous attendre, pour chacune des familles que nous venons de considérer, à certaines analogies de comportement, liées à l'identité de leurs forces de liaison.

Le fait de savoir qu'un plastique appartient à l'un des groupes: tridimensionnel, linéaire amorphe, linéaire cristallin, permet de lui attribuer, sans trop de risque d'erreur, un certain nombre de propriétés fondamentales.

Ce deuxième chapitre est consacré à l'examen de ces caractéristiques communes.

1. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

1.1. Rhéologie. — Avant de parler des propriétés communes à chaque classe, nous allons d'abord examiner un certain nombre de notions, un vocabulaire et des méthodes auxquels il faut faire appel pour étudier le comportement des plastiques.

En effet, la théorie de l'élasticité, mise au point par Hooke, Mariotte et Cauchy, ou la théorie de la plasticité, à laquelle ont participé Coulomb, Tresca, Misès, Hencky et Caquot, sont inadaptées pour étudier sous tous ses aspects le comportement mécanique des hauts polymères linéaires. On se rend compte rapidement, que des notions telles que celles de ductilité et de fragilité qui pouvaient être associées, sans ambiguïté, à des matériaux traditionnels n'ont plus de signification quand elles sont appliquées aux thermoplastes.

Certains élastomères, silicones, par exemple, s'étirent comme un mastic parfaitement inélastique quand on les sollicite lentement, se rompent quand on essaie de les étirer rapidement et rebondissent quand on les jette sur le sol. Une plaque de PCV rigide peut être pliée sur elle-même sans rupture mais vole en éclats sous l'action d'un choc. Par ailleurs, si l'on soumet un élément en matière plastique à un effort constant, sa déformation augmente avec le temps: le matériau flue. La déformation n'est pas seulement fonction de la charge, elle est fonction du temps. Ces matériaux ne se comportent donc ni comme des solides hookiens, ni comme des fluides newtoniens. Ce comportement intermédiaire n'est pas particulier aux matières plastiques; c'est également celui des métaux à haute température, celui du brai, de l'argile et des produits pâteux.

Aussi tenta-t-on à partir de 1924, et sous l'impulsion du professeur Bingham, de mettre au point une théorie de l'écoulement plastique et, en 1928, était créée une société scientifique réunissant d'une part des spécialistes de l'hydrodynamique, de l'hydraulique, de la physique, de la résistance des matériaux et d'autre part des praticiens: métallurgistes, géologues et caoutchoutiers. Cette association dont l'activité est consacrée uniquement à l'étude de l'écoulement a été appelée « Société de Rhéologie »; elle s'intéresse aussi bien à la viscoélasticité et à la viscoplasticité qu'à la mécanique des liquides visqueux. Par ailleurs la microrhéologie essaie de rattacher les phénomènes observés à la structure moléculaire ou cristalline.

1.1.1. Méthodes rhéologiques. Fluage. Relaxation. — *Équations rhéologiques:* l'objectif essentiel de la macrorhéologie consiste à établir des équations rhéologiques. Celles-ci expriment les relations mathématiques qui existent entre: les contraintes σ, les déformations ε, les opérateurs différentiels et intégraux des fonctions σ et ε, le temps t et éventuellement la température. Deux expériences permettent de définir les coefficients rhéologiques des équations d'état: l'essai de fluage et l'essai de relaxation.

L'essai de fluage: consiste à imposer une contrainte constante σ_0 ou plutôt un effort constant à une éprouvette du matériau à étudier et à suivre ses déformations en fonction du temps. Les résultats sont en général présentés sous forme d'une *courbe de fluage:* temps — déformation $[t - \varepsilon(t)]$.

Dans un *essai de relaxation:* on impose une déformation instantanée et l'on mesure la variation de la charge en fonction du temps. Les résultats expérimentaux sont traduits par un graphe: temps— contrainte $[t - \sigma(t)]$ (fig. II-1).

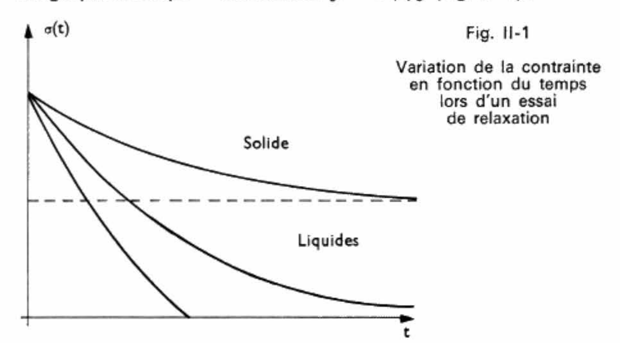


Fig. II-1

Variation de la contrainte en fonction du temps lors d'un essai de relaxation

1.1.2. Rhéologie expérimentale. — Les méthodes de détermination des équations rhéologiques et de leurs coefficients, dans le cas des matériaux solides, peuvent être divisées en deux catégories comprenant les méthodes dites statiques et les méthodes dynamiques. Dans les deux cas, on est amené à imposer des contraintes et à mesurer des déformations ou à imposer des déformations et à mesurer des contraintes. La sollicitation peut correspondre à une traction, une compression, une flexion, une torsion, etc. Nous parlerons surtout de la traction.

— *Les contraintes* généralement symbolisées par σ sont exprimées en fonction de la section initiale s_0 et de la force appliquée F:

$$\sigma = \frac{F}{s_0}$$

— *Les déformations* sont symbolisées par ε. Sous l'action d'une tension uniaxiale, une barre sur laquelle on a défini une longueur initiale L_0 entre deux repères, se déforme et cette distance entre repères devient L.

On appelle *dilatation linéaire unitaire* ou dilatation de Cauchy la grandeur donnée par l'équation suivante:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

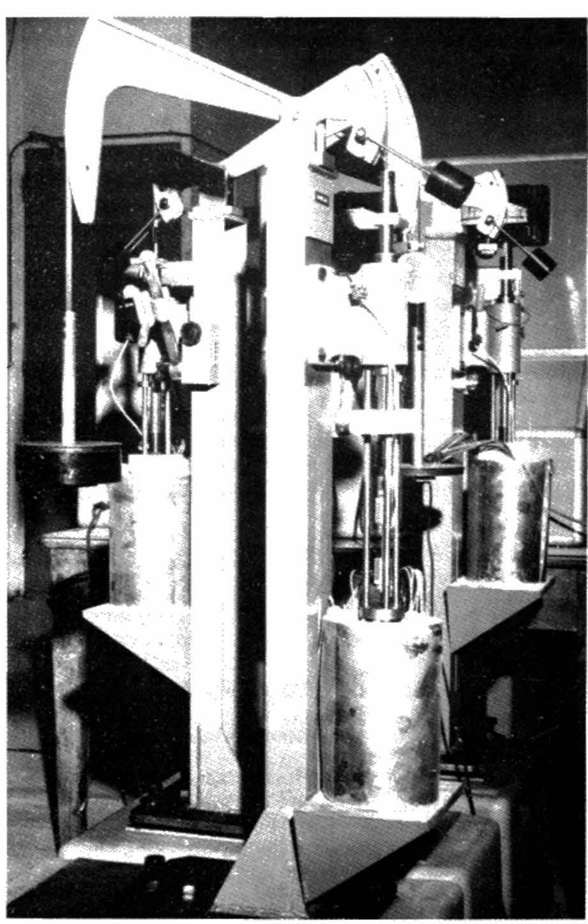
(elle est exprimée en pourcentage de la longueur initiale). On considère également la *dilatation linéaire rationnelle:*

$$\varepsilon_H = \ln \frac{L}{L_0}$$

ou *dilatation de Henky* qui rapporte l'allongement à la longueur instantanée

$\left(d\varepsilon_H = \frac{dL}{L}\right.$; en intégrant depuis l'origine on obtient $\left.\varepsilon_H\right)$.

1.1.3. Sollicitation statique. — *Essai de fluage.* — L'essai de fluage à contrainte imposée est très difficile à réaliser pratiquement; en effet, la section de l'éprouvette varie continuellement au cours de l'essai et c'est pourquoi, le plus souvent, on applique une charge constante. La méthode la plus simple consiste à suspendre une charge soit directement, soit par l'intermédiaire d'un levier, à une éprouvette suspendue à un bâti rigide et à contrôler ses



Machine de fluage (*CEMP*)

déformations. Les déformations peuvent être mesurées à l'aide de toutes les méthodes extensométriques :

— usage d'un cathétomètre ;
— dispositif potentiométrique ;
— capteur capacitif ou inductif ;
— extensomètres mécaniques du type Huggenberger.

Courbes de fluage. — Les courbes de fluage ont l'allure générale ci-après (fig. II-2). On distingue sur ces courbes,

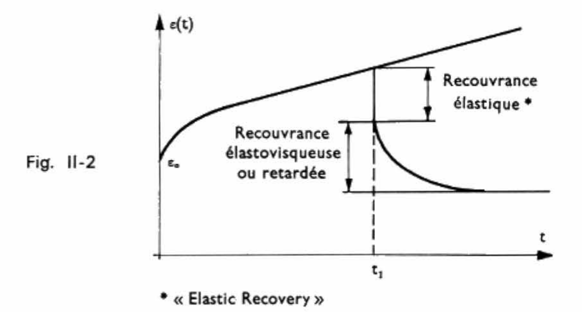


Fig. II-2

* « Elastic Recovery »

la déformation instantanée ε_0. Si on enlève la charge au temps t_1, on obtient une courbe de décharge comportant une *partie élastique* et *une partie élastovisqueuse retardée.*

On fait souvent appel à d'autres grandeurs qui peuvent conduire à des graphes comportant le temps en abscisse.

Vitesse de fluage. — Elle correspond à l'augmentation de la déformation par unité de temps $\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)$; elle est évidemment définie en tout point de la courbe par la tangente à celle-ci.

La pratique usuelle consiste plutôt à mesurer une vitesse moyenne :

$$K_F\ (t_2, t_1) = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1}$$

où ε_2 et ε_1 sont respectivement les déformations de Cauchy observées aux temps t_2 et t_1.

Indice de fluage. — C'est l'augmentation de la déformation $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$, pour un intervalle de temps donné, $t_2 - t_1$; elle est exprimée en pourcentage de la déformation ε_1 :

$$K'_F = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \times 100 = \frac{K_F\ (t_2 - t_1)}{\varepsilon_1} \times 100$$

Module apparent. — C'est le rapport contrainte-déformation à un moment quelconque de l'essai de fluage. On le symbolise par :

$$E_F\ (t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)}$$

Durée de vie. — On trace quelquefois les courbes de durée de vie obtenues en poursuivant l'essai de fluage jusqu'à la rupture : on porte le temps au bout duquel la rupture est obtenue en abscisse et la contrainte appliquée en ordonnée.

Essais de relaxation. — Ils sont habituellement faits dans un intervalle de temps compris entre 1 et 10^6 secondes. La limite supérieure est liée à la patience de l'expérimentateur ; la limite inférieure dépend de la difficulté d'imposer une déformation dans des temps très courts sans fausser l'expérimentation par des effets d'inertie et des effets thermiques. Quand on n'enregistre pas les efforts, la limite inférieure est beaucoup plus voisine de 10 secondes que de 1 seconde. Tobolsky, dont nous aurons l'occasion de de citer de nouveau les travaux, a effectué des essais de relaxation à l'aide d'une balance, les déformations étant imposées grâce à une vis micrométrique.

Courbes de relaxation. — Les résultats sont en général traduits en courbes : $\sigma(t) - t$ ou le plus souvent $\sigma(t) - \lg t$.

Module de relaxation. — Il peut être défini par analogie avec le module apparent en fluage.

On a :
$$E_r\ (t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$$

1.2. Composés tridimensionnels

1.2.1. Caractéristiques physiques et mécaniques à la température ambiante

1° *Caractéristiques physiques.* — Les résines thermorigides sont amorphes et, par suite, lorsqu'elles ne sont ni chargées ni artificiellement colorées elles sont transparentes. Les formo-phénoliques et les polyépoxydes de même que les époxy-phénoliques sont assez colorées ; les résines urée-formol, mélanine-formol et les polyesters sont plus ou moins incolores, ces derniers étant souvent moins limpides que les aminoplastes.

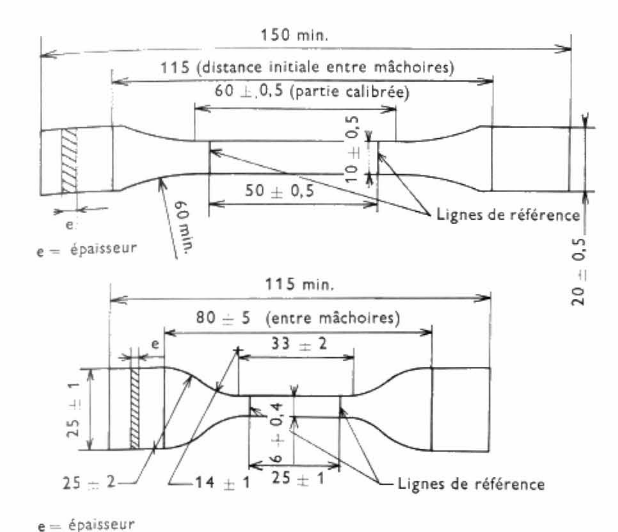
Les valeurs de la masse volumique ρ et du coefficient de dilatation linéaire λ sont voisines de celles des polymères linéaires amorphes, comme nous le verrons plus loin ; voici quelques valeurs :

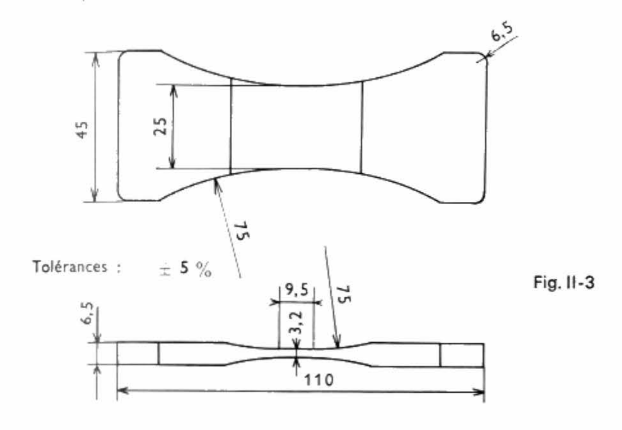
Produits caractéristiques	P F	M F	U F	E P	U P	Valeurs extrêmes
ρ (1)	1,26	1,48	1,4—1,5	1,2	1,15	1,15—1,50
λ (2)	38.10^{-6}	30.10^{-6}	30.10^{-6}	60 à 65.10^{-6}	80 à 100.1 -0^{6}	30 à 100.10^{-6}

(1) En grammes par centimètre cube ; (2) en degrés Celsius à la puissance moins un.

2° *Caractéristiques mécaniques*

a) *Essais de traction.* — La figure II-3 donne les différents schémas d'éprouvettes définies par la recommandation ISO TC 61 R 527.





Tolérances : ± 5 %

Fig. II-3

La courbe obtenue pour des résines thermorigides a habituellement l'allure ci-après (fig. II-4). Le module d'élasticité, défini à partir de la tangente à l'origine de la courbe, $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ est homogène à une contrainte.

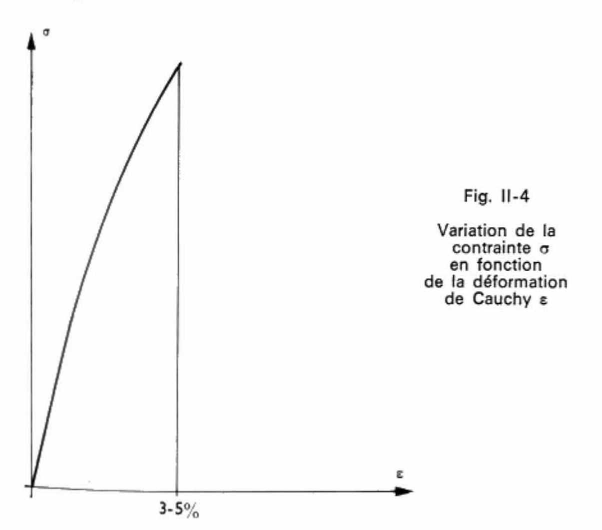


Fig. II-4

Variation de la contrainte σ en fonction de la déformation de Cauchy ε

La déformation est réversible jusqu'à la rupture ; dans un essai adiabatique, elle s'accompagne d'un abaissement de température ΔT pour l'éprouvette :

$$\Delta T = \frac{-\lambda}{\rho C} T_0 \sigma$$

si l'on appelle C la chaleur massique et T_0 la température de l'essai ; ΔT est habituellement inférieur à 1 °C.

b) *Compression.* — Un essai de compression effectué à partir d'une éprouvette cylindrique ou parallélépipédique, conduit à des valeurs beaucoup plus grandes. La rupture se produit habituellement en sifflet.

c) *Torsion.* — Un essai de torsion conduit à une rupture en hélice.

Le tableau donné en bas de page rassemble quelques valeurs de E, de σ_T, de σ_C (contraintes de rupture en traction et en compression) et de ε.

1.2.2. Influence de la température sur les caractéristiques mécaniques. — Les liaisons intramoléculaires, qui assurent, comme nous l'avons vu, la cohésion de l'ensemble, sont peu affectées par la température, de sorte que toutes les caractéristiques mécaniques varient peu, en fonction de la température, jusqu'à une température de décomposition, qui se situe en général entre 300 et 400 °C. Le module d'élasticité diminue de façon linéaire en fonction de la température (fig. II-5) ainsi que la contrainte de rupture ; au contraire, l'allongement à la rupture augmente légèrement. Toutefois, une exposition permanente à des températures comprises entre 110 et 140 °C peut entraîner des modifications de forme ou d'aspect et ces températures sont considérées comme températures limites d'emploi.

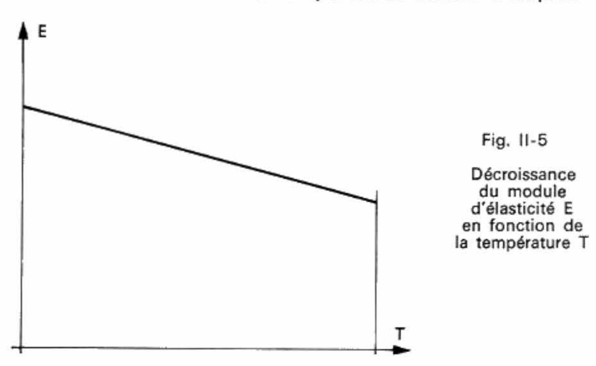


Fig. II-5

Décroissance du module d'élasticité E en fonction de la température T

La thermosensibilité augmente quand l'indice de réseau diminue ; les courbes $E - T$ et $\sigma - T$ des polyesters et surtout des éthoxylines, qui sont moins réticulés que les phénoplastes et les aminoplastes, varient plus rapidement avec la température T que celles relatives à ces derniers. Cela a valu à ces thermorigides peu réticulés, la désignation de semi-thermoplastes, donnée par certains auteurs.

La mise en œuvre des matières thermodurcissables par compression ou par transfert consiste, après la mise en forme à chaud de la résine, à parfaire la réticulation chimique du produit moulé. Si le travail est mal fait, la réticulation est imparfaite et le matériau résultant conserve une certaine thermoplasticité résiduelle s'accompagnant, comme nous le verrons plus loin, d'une solubilité partielle dans les solvants.

1.2.3. Influence du temps. — Les essais de traction que nous avons examinés ci-dessus, conduisent à des résultats qui diffèrent en fonction de la vitesse de sollicitation. Les diagrammes obtenus correspondent toujours à des déformations de corps fragiles et Lhermite a montré que la contrainte de rupture variait linéairement en fonction du logarithme de la vitesse de sollicitation.

Produits caractéristiques	P F	M F	U F	E P	Polyester	Valeurs extrêmes
E (en décanewtons par millimètre carré)	320-500	700-1 000	700-1 000	300-400	450	300-1 000
σ_T (en décanewtons par millimètre carré)	5,5	4-8	4-8	6-7	2,5-7	2,5-8
σ_C (en décanewtons par millimètre carré)	15-30	28-30	17-35	12	15	12-35
ε (pourcentage)	1 à 1,5 %	0,5 à 1 %	0,5 à 1 %	5-8 %	5-7 %	0,5 à 8 %

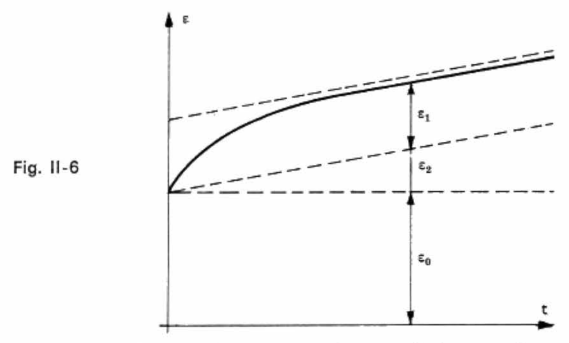


Fig. II-6

L'aptitude au fluage de ces matériaux croît lorsque leur indice de réseau diminue.

1.3. Composés macromoléculaires linéaires amorphes

1.3.1. Caractéristiques physiques et mécaniques à la température ambiante. — Les polymères amorphes homogènes, isotropes et exempts de charge ont des masses volumiques comprises entre 1 et 1,5 g/cm^3, ils sont transparents; les polymères ou copolymères amorphes non colorés et non chargés qui sont translucides ou opaques ne sont pas homogènes à l'échelle microscopique (PVC en émulsion). Les coefficients de dilatation linéaires sont compris entre 50 et 80 10^{-6} K^{-1}.

Essais de traction. — Lorsqu'on soumet les composés macromoléculaires linéaires amorphes à des essais de traction à la température ambiante, on trouve trois types de diagrammes; le premier correspond à une **déformation fragile,** le second à une **déformation ductile** et le troisième, qui est propre aux **élastomères** et ne nous intéresse qu'à titre d'exemple, correspond à une **déformation caoutchoutique** de grande amplitude.

1° *Déformation fragile.* — À la température ambiante, certains polymères ou copolymères linéaires amorphes donnent des diagrammes de traction, à vitesse de déformation imposée, ayant une forme très voisine de celle donnée par la figure II-4. C'est le cas du PS, du PMMA, du SAN. Les allongements de rupture sont relativement faibles et voisins de 5 %.

Les modules d'élasticité varient entre 300 et 500 daN/mm^2. La déformation s'accompagne d'un refroidissement général de l'éprouvette, très faible mais mesurable à l'aide de méthodes microcalorimétriques et de même origine thermodynamique que celui observé avec les résines thermorigides. Par ailleurs, pour des essais de courte durée, la déformation semble être entièrement réversible jusqu'à la rupture. Des déterminations de Dantu, qui a appliqué la méthode du moiré, permettent de l'affirmer.

Méthode du moiré. — C'est la méthode des réseaux qui fait appel au phénomène du « moiré ». Elle permet de déterminer en chaque point de la surface de l'éprouvette, à n'importe quel instant, les composantes du tenseur des déformations.

On reproduit sur l'éprouvette, une trame microscopique formée de deux réseaux à 90°, dont le pas est compris entre 10 et 200 μm. On cinématographie ensuite la formation d'interférences entre ce réseau et un réseau témoin. Pour les grandes déformations, la méthode du moiré est surabondante et l'on se contente d'un simple quadrillage, à pas beaucoup plus grand dont on photographie les déformations. Le quadrillage peut être reproduit par une méthode photographique identique à celle que l'on met en œuvre pour la préparation des circuits imprimés en électronique.

De cette façon Dantu a montré que pour le PMMA, le moiré restait toujours régulier, formé de droites verticales équidistantes et de droites horizontales équidistantes, même au voisinage de la rupture. L'allongement axial s'abaisse brusquement après la rupture jusqu'à une valeur de 10^{-3} et il décroît rapidement pour devenir pratiquement nul au bout de 600 secondes. Cela revient à dire que dans un essai court, *la déformation est en grande partie élastique* et que *la partie élastovisqueuse est peu retardée*; il n'y a pas de composante visqueuse de la déformation.

Essais de fluage. — Lethersich a fait une étude intéressante consistant à effectuer une série d'essais de fluage et à décomposer chaque courbe de fluage, de façon à faire ressortir la déformation instantanée ε_0, la déformation retardée ε_1 et la déformation visqueuse ε_2, comme cela est indiqué sur la figure II-6. Le même travail ayant été fait pour les courbes obtenues avec d'autres contraintes $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \ldots \sigma_n$. Il a ensuite tracé les courbes isochrones correspondant aux déformations élastique, retardée et visqueuse. L'examen de la courbe déformation-contrainte (fig. II-7) isochrone au bout de 100 heures, montre que le PMMA étudié à 30 °C, cesse d'être linéaire pour 0,75 daN/mm^2. L'examen de la courbe isochrone « visqueuse » montre que le matériau se déforme d'une façon irréversible appréciable, seulement à partir de 3,15 daN/mm^2 et cette déformation ne correspond alors qu'à 2 % de la déformation totale, elle-même égale à 9 % de la longueur initiale, soit une déformation irréversible de $1{,}8 . 10^{-3}$.

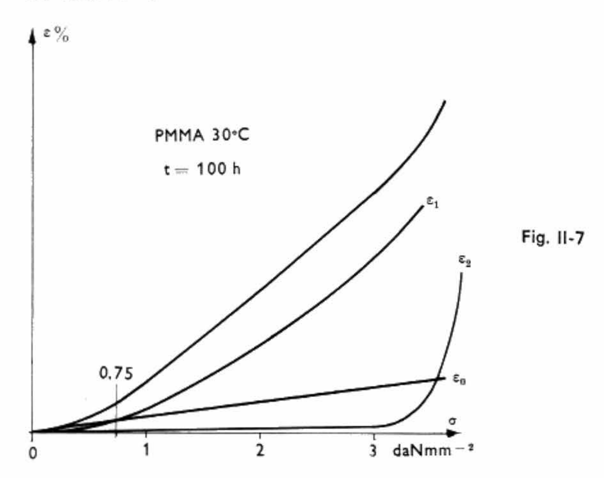


Fig. II-7

Fissuration. — La déformation des polymères amorphes à la température ambiante conduit à une fissuration très fine qui apparaît à partir d'un allongement critique dépendant de la vitesse de sollicitation. Cette fissuration appelée « crazing » par les Anglo-Saxons est favorisée par certaines ambiances sensibilisatrices, vapeurs ou liquides, alcool pour le PMMA, hydrocarbures pour le PS. On a mesuré les allongements critiques à partir desquels la fissuration se produisait. Ces mesures ont été entreprises à Princeton où l'on a utilisé une méthode photométrique. Ziegler aux États-Unis d'Amérique est arrivé au même résultat, en enroulant les éprouvettes étudiées autour d'un cylindre, dont la directrice est une courbe à courbure variable, ellipse ou spirale; il a déterminé ensuite le rayon de courbure pour lequel on observe les premières fissures; ensuite, en tenant compte de l'épaisseur de l'échantillon, il a calculé l'allongement correspondant dans la partie tendue.

L'allongement critique de fissuration correspond à 0,75 % pour le PMMA et le PS. Cet allongement est fonction du temps; on trouve des valeurs de ε voisines de 0,5 % pour le PMMA, à partir d'essais de fluage.

Le « crazing » a été étudié sous d'autres aspects, on a essayé de définir son origine structurale et on a pensé en particulier que la configuration même des macromolécules pouvait entraîner statistiquement l'existence de zones où les forces de liaison intermoléculaire étaient en majorité parallèles à l'axe de l'effort. Le crazing est de toute façon lié à la structure macromoléculaire. L'orientation biaxiale du PMMA (dans le fond d'une pièce thermo-formée par exemple) diminue considérablement l'aptitude à la fissuration. Un chauffage effectué au-dessus de la température de transition fait disparaître toute trace visible de crazing.

Par ailleurs, cette fissuration peut se produire dans des pièces injectées, formées ou extrudées, présentant des tensions internes et en particulier des tensions d'orientation.

Le crazing est responsable de la rupture. — Des études nombreuses entreprises en Allemagne par Schardin et Smekal ont été consacrées à l'étude de la rupture fragile; elles montrent que les microfissures (à la périphérie des éprouvettes) sont à l'origine de la rupture et que les fronts

de rupture issus de la fissure périphérique et des fissures internes qui se trouvent dans le même plan, conduisent à des limites de séparation hyperboliques.

2° *Écoulement « à froid »*. — Le phénomène désigné à tort par « étirage à froid » (appelé « cold drawing » en anglais, « kalt verstreckung » en allemand), peut être observé avec le PCV, les CA, CAB, CAP, les ABS, etc. et nous le verrons plus loin avec la plupart des polymères cristallins. La figure II-8 montre la courbe $\sigma - \varepsilon$ type avec le seuil haut, le seuil bas et le point de rupture.

La mesure des échanges calorifiques dans un essai de traction permet d'obtenir le diagramme $\Delta T - \varepsilon$ (fig. II-9).

Les modules d'élasticité des polymères amorphes qui conduisent à des diagrammes de ce type sont compris entre 150 et 300 daN/mm².

Les contraintes au seuil haut et bas et à la rupture sont comprises entre 3 et 7,5 daN/mm².

L'allongement à la rupture est compris entre 15 et 300 %. L'allongement au seuil d'écoulement haut est habituellement compris entre 10 et 30 %.

« L'étirage à froid » a été étudié de près sur le plan phénoménologique et un peu sur le plan thermodynamique. Après le seuil haut, la déformation se traduit par une striction avec un ou deux « fronts d'écoulement » de part et d'autre de la striction. Dans certains cas, un seul front se déplace mais il arrive que les deux se déplacent en même temps.

La photographie ci-après montre un diagramme de traction $\varepsilon - \sigma$ correspondant à la formation d'une striction (c'est le diagramme de traction d'un polymère cristallin mais le phénomène, son enregistrement et les déformations de l'éprouvette sont les mêmes pour un polymère amorphe). Sur le diagramme, nous avons placé les photographies de l'éprouvette au cours de l'essai, des cercles ont été reproduits sur l'éprouvette par procédé photographique et chaque photographie peut être rattachée à un point de la courbe.

Par ailleurs, signalons que les produits non homogènes à l'échelle microscopique, blanchissent dans la zone étirée. Ce phénomène a été utilisé dans les appareils marqueurs du type « Dymo ».

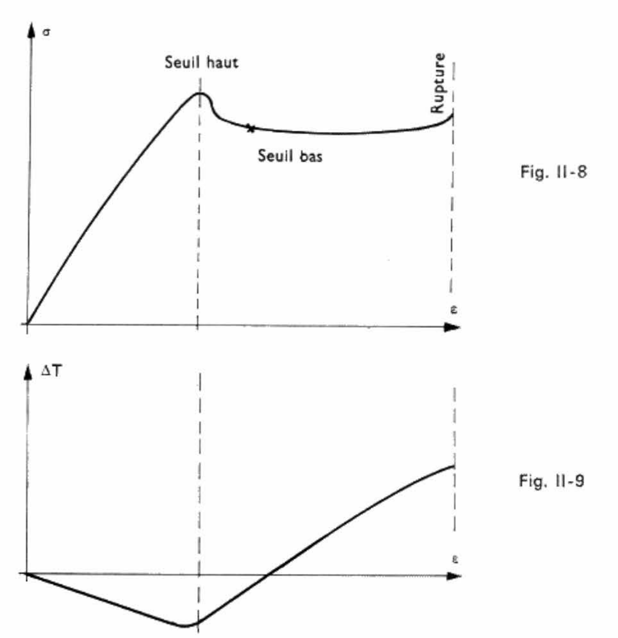


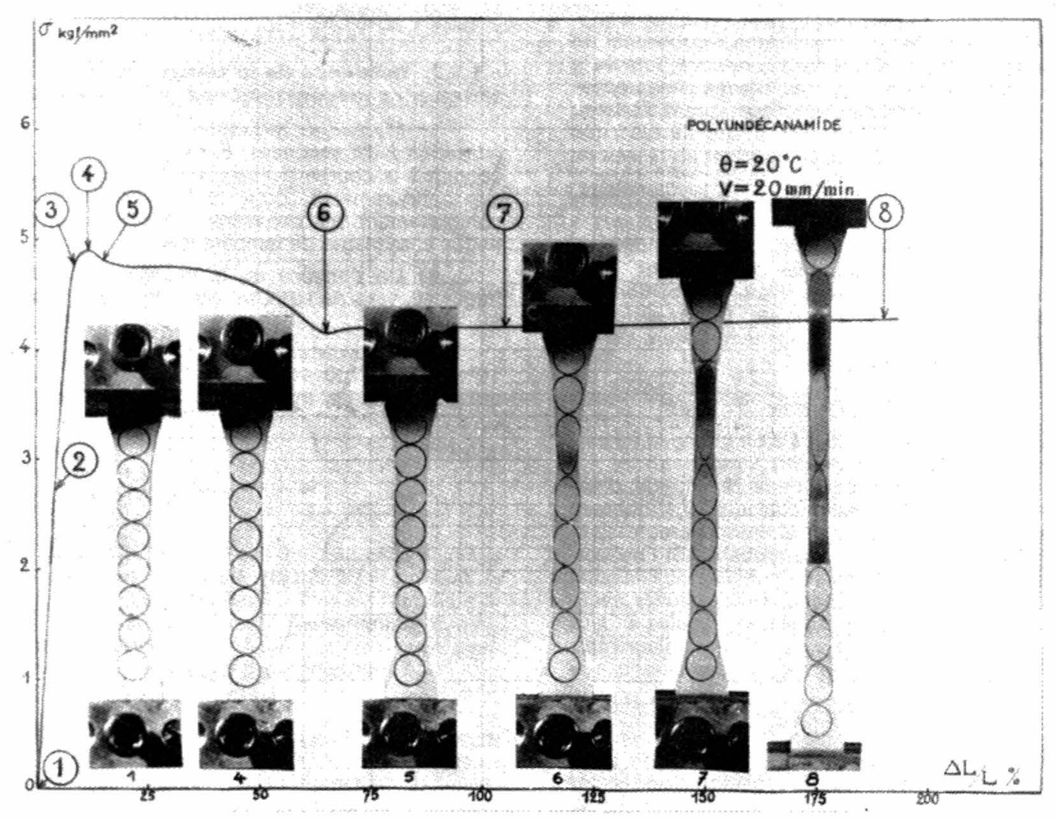
Fig. II-8

Fig. II-9

3° *Courbes des matériaux caoutchoutiques*. — D'autres produits amorphes, par exemple les copolymères fluorure de vinylidène-hexafluoro-propylène (viton, élastomères Voltalef) ou éthylène-propylène, se comportent comme des élastomères à la température ambiante, la courbe de traction est représentée sur la figure II-10.

Le module d'élasticité est faible à l'origine (< 1 daN/mm²) et il décroît rapidement des deux tiers de sa valeur ; il augmente ensuite pour de grands allongements. Le coefficient de Poisson est égal à 0,5, c'est-à-dire que la déformation est isochore.

Remarque. — On détermine souvent un *module sécant* à partir d'un allongement conventionnel (100 % par exemple).



Variation de la contrainte σ (exprimée en décanewtons par millimètre carré) en fonction de l'allongement $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100$ (pourcentage)

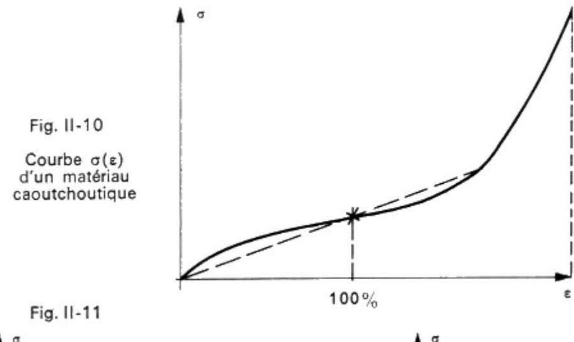


Fig. II-10

Courbe σ(ε) d'un matériau caoutchoutique

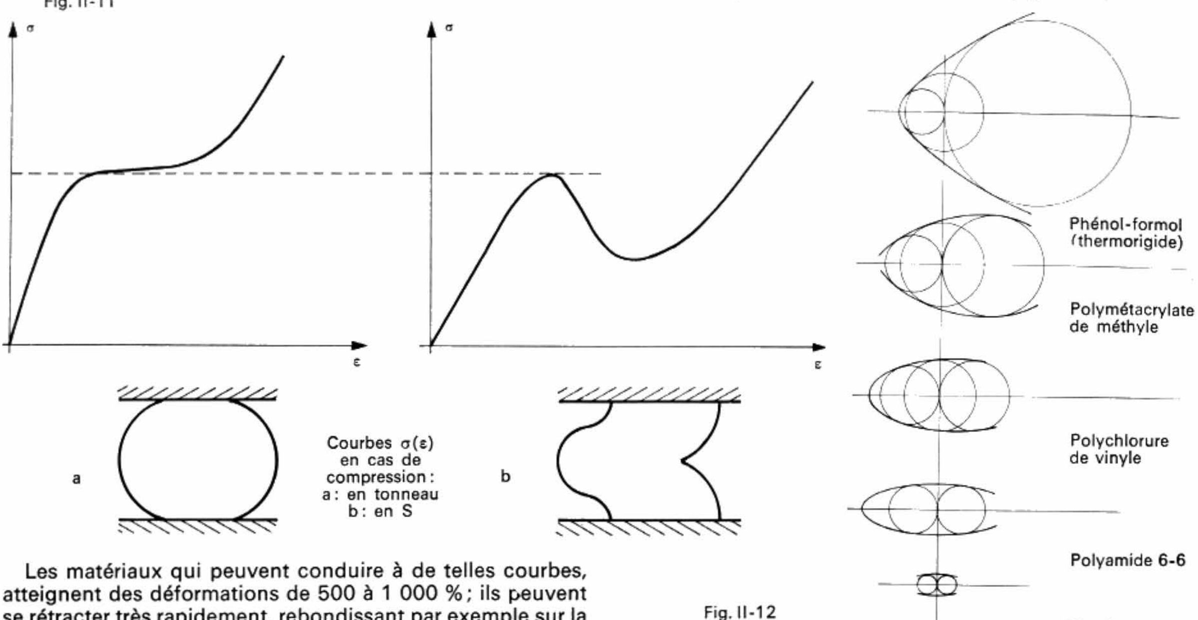


Fig. II-11

Courbes σ(ε) en cas de compression : a : en tonneau b : en S

Fig. II-12

Essais à 20 °C

Les matériaux qui peuvent conduire à de telles courbes, atteignent des déformations de 500 à 1 000 % ; ils peuvent se rétracter très rapidement, rebondissant par exemple sur la surface où on les laisse tomber.

Mécanisme. — Le principal mécanisme responsable de l'élasticité caoutchoutique réside dans la rotation libre de la chaîne principale. Il faut donc que les liaisons intermoléculaires soient extrêmement faibles. Pour que l'élasticité caoutchoutique puisse se manifester, il faut de plus que les macromolécules enchevêtrées comportent un réseau de points de fixation des chaînes entre elles.

Ces points de fixation peuvent correspondre à des points d'emmêlement mécaniques (en anglais *entanglement*) à des microcristallites : les copolymères peuvent comporter des séquences régulières susceptibles de cristalliser.

L'étude thermodynamique du problème a été abordée depuis longtemps par Joule, Kuhn, etc. Des mesures de température de surface montrent que la température s'élève depuis le début de l'expérience.

$$\Delta T = \frac{-\lambda}{\rho C} T_0 \sigma$$

λ est négatif et le module d'élasticité croît quand la température augmente (Effet Joule-Gough).

La déformation s'accompagne d'une diminution d'entropie de configuration. Les macromolécules abandonnent la forme que nous avions décrite pour prendre progressivement une forme de moins en moins probable. Si l'on examine l'éprouvette qui se déforme, on constate qu'elle subit une *transformation affine* sans striction ; des cercles tracés en surface sont transformés en des ellipses de plus en plus aplaties. Nous n'insisterons pas sur ce type de diagramme obtenu à la température ambiante car il correspond à la courbe d'un élastomère.

Essai de compression — Courbes intrinsèques. — Tous les polymères amorphes, qu'ils soient fragiles ou plastiques en traction, donnent des déformations ductiles en compression, pour des vitesses de déformation voisines de 100 % à la minute. Au contraire, ceux qui donnent des courbes élastomériques en traction, se comportent comme des élastomères en compression.

Nous avions dit qu'il n'était pas possible de parler de ductilité ou de fragilité, sans se référer à un temps, pour cette raison nous préciserons également le type de contrainte exercée.

Les courbes de compression, qu'il s'agisse d'une déformation en tonneau ou en S, donnent une contrainte au seuil identique. Les courbes σ — ε ont alors les allures respectives ci-après (fig. II-11).

Courbes intrinsèques. — On appelle courbes intrinsèques, les courbes enveloppes des cercles de Mohr. Comparées aux courbes données par des résines thermorigides, elles sont très fermées, ce qui correspond à des corps plus ductiles ; à titre d'exemple, nous donnons les courbes intrinsèques du PMMA et du PCV (fig. II-12).

1.3.2. Influence de la température sur les caractéristiques mécaniques des polymères amorphes

1° *Module de relaxation.* — L'étude du module de relaxation à 10 secondes : E_r (10) entreprise par Tobolsky, conduit à la courbe température T — lg E_r (10) présentée sur la figure II-13. Cette courbe est caractéristique du comportement des polymères amorphes. Tobolsky y distingue cinq plages de températures :

a) Un domaine où le matériau est *vitreux* dur et fragile ; E_r varie de $10^9 N/m^2$ à $5 . 10^9 N/m^2$ (limite supérieure 90 °C).

b) *Une zone de transition* avec E_r (10) compris entre $10^9 N/m^2$ à $700 . 10^3 N/m^2$. Les auteurs anglo-saxons utilisent pour les matériaux considérés dans cette zone,

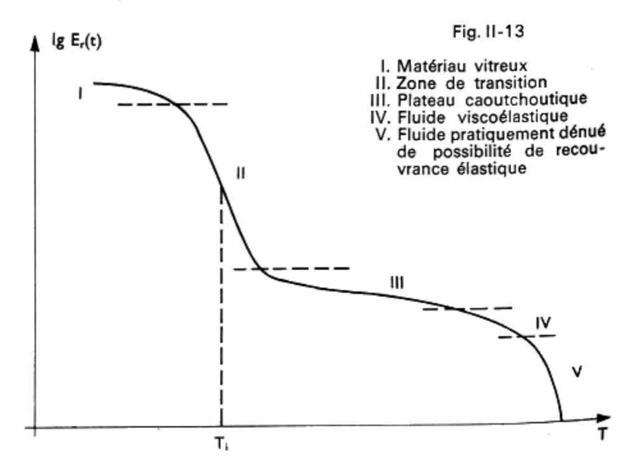


Fig. II-13

l'expression « *leather like* » indiquant qu'ils ont la consistance du cuir (entre 90 et 120 °C pour le polystyrène).

c) *Le plateau caoutchoutique* entre $7.10^3 N/m^2$ à $400.10^3 N/m^2$ (120 à 150 °C pour le polystyrène). Le matériau se comporte comme un élastomère.

d) Une zone où le module de relaxation passe de $400.10^3 N/m^2$ à $50.10^3 N/m^2$ et où le matériau se comporte comme un *fluide viscoélastique* (de 150 à 177 °C).

e) Une zone où les modules sont inférieurs à $10.10^3 N/m^2$ et où le matériau est un fluide presque totalement dénué de possibilité de recouvrance élastique.

Ces cinq zones sont donc séparées par quatre températures qui sont respectivement :

	I	II	III	IV
Pour le polystyrène .	−90 °C	120 °C	150 °C	177 °C
Pour un polysulfure (1) (Thiokol ST) . . .	−60 °C	−40 °C	+180 °C	+230 °C
Pour un caoutchouc naturel vulcanisé . .	−60 °C	−40 °C	+190 °C	+220 °C

(1) Disulfure ou tétrasulfure —C≡C—S—S—C≡C—S—S— ou ≡C—S(—S)—S(—S)—C≡C—

Pour les élastomères, l'allure de la courbe est la même mais le plateau caoutchoutique est considérablement plus étendu.

Influence de la masse moléculaire. — Pour des masses moléculaires suffisamment grandes, les variations de masse moléculaire M_n entraînent peu de changement dans l'allure des deux premières zones. Toutefois, la température correspondant à la borne supérieure du plateau caoutchoutique augmente avec M_n. Les domaines de température où le matériau est fluide sont également notablement affectés par la masse moléculaire. On retient habituellement deux valeurs du module, E_1 valeur la plus grande dans la zone vitreuse, E_2 module dans le plateau caoutchoutique. On définit une température au point d'inflexion (fig. II-14) à partir d'un module E_{1i} tel que :

$$\lg E_{1i} = \frac{1}{2} (\lg E_1 + \lg E_2)$$

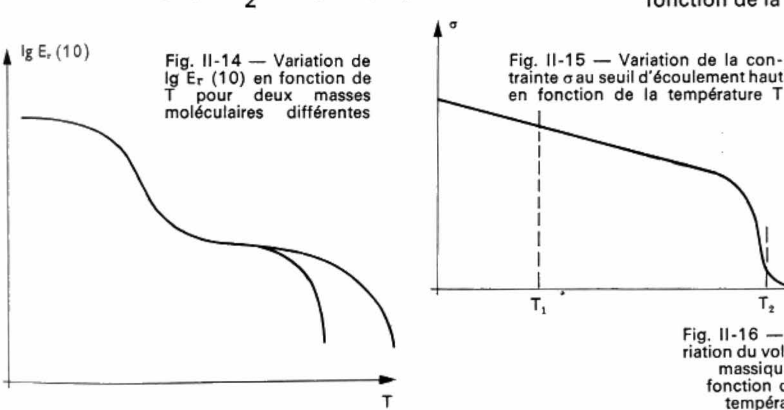
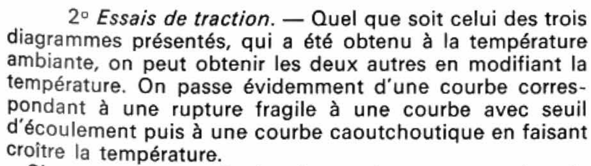


Fig. II-14 — Variation de lg Er (10) en fonction de T pour deux masses moléculaires différentes

Fig. II-15 — Variation de la contrainte σ au seuil d'écoulement haut en fonction de la température T



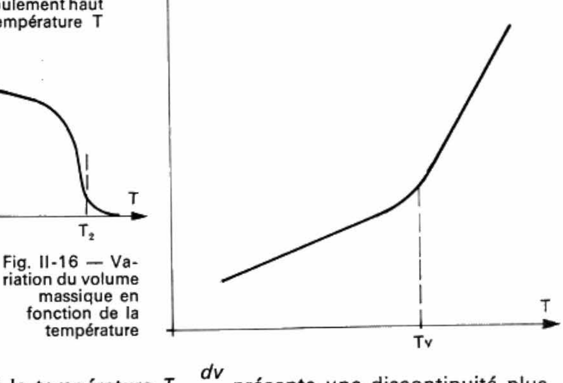


Fig. II-16 — Variation du volume massique en fonction de la température

2° *Essais de traction.* — Quel que soit celui des trois diagrammes présentés, qui a été obtenu à la température ambiante, on peut obtenir les deux autres en modifiant la température. On passe évidemment d'une courbe correspondant à une rupture fragile à une courbe avec seuil d'écoulement puis à une courbe caoutchoutique en faisant croître la température.

Si nous portons en abscisse la température et en ordonnée la contrainte au seuil haut ou la contrainte de rupture (rupture fragile), la courbe résultante a l'allure du diagramme de la figure II-15 sur lequel nous définirons trois zones :

— une zone de rupture fragile ;
— une zone de déformation plastique ;
— une zone de déformation caoutchoutique.

Si nous désignons par T_1 et T_2 les températures limites, nous pouvons dire que T_2 n'est pas éloignée de T_i température au point d'inflexion dans les diagrammes que nous avons vus précédemment.

3° *Mesure des températures de surface.* — La mesure des températures de surface de l'éprouvette par une méthode différentielle montre qu'à partir de 79 à 80 °C pour le PCV, la température de l'éprouvette ne s'abaisse plus mais croît de façon sensible comme cela se produit pour les élastomères.

4° *Température de transition vitreuse.* — Les températures que l'on peut définir à partir des différentes zones viscoélastiques ou à partir des modifications de comportement mécanique en traction ou en compression sont, comme nous le verrons, fortement dépendantes du temps, de sorte que l'on préfère généralement faire appel à d'autres modes opératoires pour définir une température de transition.

Voyons d'abord à quoi peut correspondre cette température de transition au niveau moléculaire.

Considérons la structure des macromolécules linéaires enchevêtrées, telle que nous l'avons définie. Les tronçons de chaînes et les groupements d'atomes latéraux sont animés de mouvements dont la fréquence et l'amplitude dépendent : de l'énergie thermique kT (avec k constante de Boltzmann égale à $1{,}38.10^{-23}$ J/K), de la hauteur de la barrière de potentiel et du volume libre.

Volume libre : il est égal à : $V_1 = V - V_0$ si nous appelons V le volume massique du produit dans l'état considéré et V_0 le volume massique du liquide extrapolé à 0 K, sans changement de phase.

À température suffisamment basse, le volume libre devient très petit et l'énergie thermique est trop basse comparée à la hauteur de la barrière de potentiel, de sorte que les mouvements de rotation et de translation des tronçons de chaînes sont impossibles. L'ensemble est « bloqué » et l'on peut seulement avoir des mouvements vibratoires des segments et des groupes d'atomes. Cet état « gelé » est qualifié de vitreux.

Si la température augmente, à partir de la température T_v, on obtient une liberté et une agitation de plus en plus grande, des tronçons de chaînes. Cette température peut être précisée à partir de la courbe du volume massique v en fonction de la température (fig. II-16).

À la température T_v, $\frac{dv}{dt}$ présente une discontinuité plus ou moins nette. L'allure de la courbe dépend de la vitesse d'élévation de la température ou de la vitesse de refroidissement, donc du temps mais la valeur de T_v est définie à l'intérieur d'un intervalle de quelques degrés.

Cette température de transition vitreuse est une des caractéristiques les plus importantes des polymères amorphes.

La loi des états correspondants, que l'on a essayé d'appliquer aux polymères amorphes, fait appel à une variable réduite qui est en général T_v ou $T - T_v$.

Pour les copolymères amorphes :

$$T_v = x_1 T_{v1} + x_2 T_{v2}$$

x_1 et x_2 étant les fractions molaires des deux monomères et T_{v1} et T_{v2} désignant les températures de transition vitreuses des homopolymères correspondants.

La connaissance de T_v présente un intérêt évident.

À une température supérieure à T_v, une pièce injectée, un profilé extrudé ou une pièce formée à partir d'un polymère amorphe, cesse d'être utilisable en temps que plastomère. On peut dire également qu'en dessous de T_v les élastomères cessent d'être utilisables en tant qu'élastomères.

1.3.3. Importance du temps dans les déterminations thermomécaniques. — Les différents intervalles de température définissant les régions viscoélastiques dépendent du temps de référence choisi arbitrairement égal à 10 secondes par Tobolsky, à 60 secondes environ pour les mesures de dureté et les essais de traction.

1° *Courbes $E_r(t)$ — T.* — Si l'on trace les courbes de relaxation en fonction de la température pour des temps différents, par exemple : 5, 10, 100 et 1 000 secondes, on s'aperçoit que E_1 et E_2 sont peu modifiés mais que toutes les températures limites des intervalles sont déplacées vers des températures d'autant plus basses que le temps de référence est plus grand (fig. II-17).

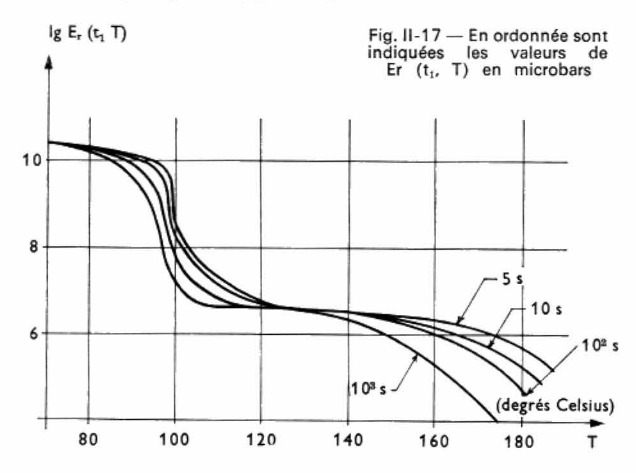


Fig. II-17 — En ordonnée sont indiquées les valeurs de Er (t_1, T) en microbars

2° *Essais de traction.* — De la même façon, des essais de traction à vitesse imposée conduisent à des résultats non seulement quantitativement mais qualitativement différents (fig. II-18).

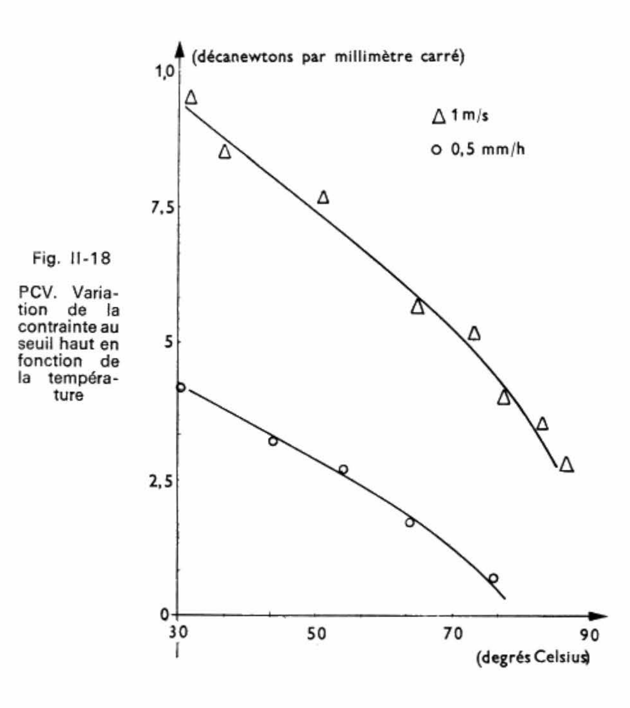


Fig. II-18

PCV. Variation de la contrainte au seuil haut en fonction de la température

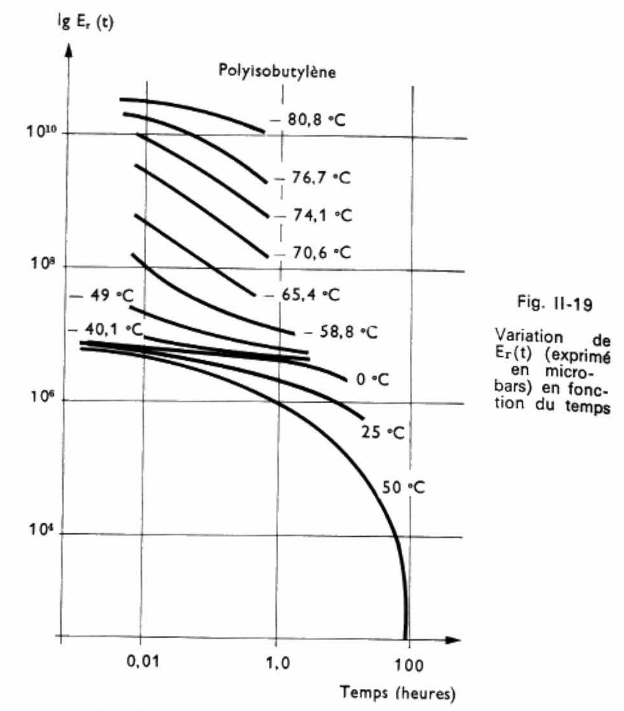


Fig. II-19

Variation de Er(t) (exprimé en microbars) en fonction du temps

3° *Correspondance temps-température.* — Nous avons vu que le domaine de temps exploré par l'essai de relaxation s'étendait raisonnablement de 10 à 10^5 ou 10^6 secondes. Les courbes isothermes montrent clairement que quatre ou cinq décades du logarithme du temps ne suffisent pas pour révéler tous les aspects viscoélastiques du comportement d'un polymère amorphe.

Le diagramme (fig. II-19) qui porte en abscisse le logarithme du temps exprimé en heures et en ordonnée la valeur de E_r (t) pour du polyisobutylène ressemble fortement au diagramme (fig. II-20), qui concerne le PMMA. Ces courbes se superposent dans une translation parallèlement à l'axe du logarithme du temps. Cela revient à multiplier ou à diviser l'échelle des temps par un facteur dépendant de la température. Par exemple, en appelant : E_rT (t) le module de relaxation à la température T en fonction du temps t et E_r T_0 (t) le module de relaxation à la température de réfé-

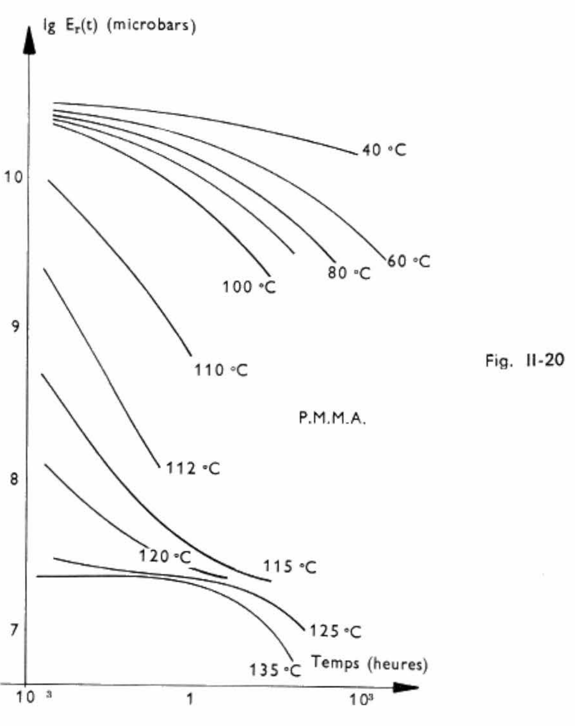


Fig. II-20

rence choisie arbitrairement T_0 en fonction du temps, on a :

$$E_r\, T[k\,(T)\,.\,t] = E_r\, T_0(t)$$

La quantité k est obtenue directement par la mesure graphique du décalage ; c'est seulement une fonction de la température et elle est choisie égale à l'unité à la température de référence T_0 ; k est une fonction qui décroît quand la température croît. De plus, il vient : $E_r T_0\left[\frac{t}{k(T)}\right] = E_r T(t)$.

Nous voyons donc que la fonction $E_r\,(t/k)$ est indépendante de la température, quand nous la représentons en fonction de t/k ou de lg (t/k). La courbe représentative de cette fonction est appelée *courbe maîtresse* (fig. II-21).

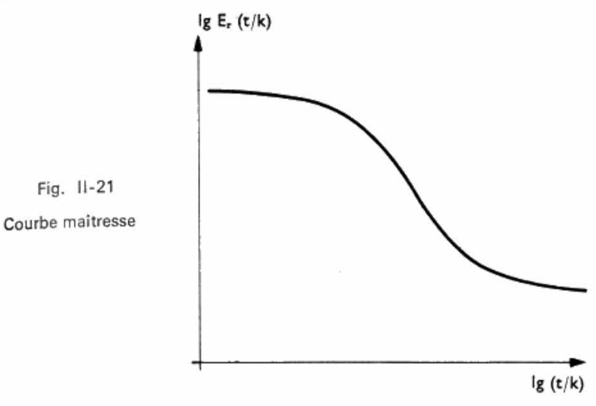


Fig. II-21
Courbe maîtresse

Temps de transition. — De la même façon qu'a été définie une température de transition au point d'inflexion de la courbe lg E_r (10 s) — T on définit, pour chaque courbe isotherme lg $E_r(t)$ — lg t, un « temps de transition » ou « temps caractéristique de relaxation » τ.

À la température considérée, les composés macromoléculaires linéaires amorphes se comporteront comme des solides élastiques, comme des élastomères ou comme des liquides visqueux en fonction de $\frac{t}{\tau}$, t correspondant à la durée de l'expérience.

À la température ambiante, les matériaux conduisant à des temps de transition voisins de la seconde, seront des élastomères. Au contraire, pour les plastomères τ est relativement grand.

Le temps de transition est une fonction de la température. La même étude peut être faite à partir de la variation du module de fluage ou de la complaisance de fluage $E_F(t)$ ou $J_F(t)$; le temps de *retardation* ainsi défini est très peu différent de τ.

1.3.4. Caractéristiques des polymères amorphes fondus

1° *Analyse thermique simple.* — Si nous chauffons un polymère amorphe, nous avons vu qu'il devenait progressivement caoutchoutique, viscoélastique et visqueux, au cours de cette transformation ; entre T_v et une température pour laquelle le produit est fluide nous n'observons pas de point singulier sur la courbe d'analyse thermique simple (fig. II-22).

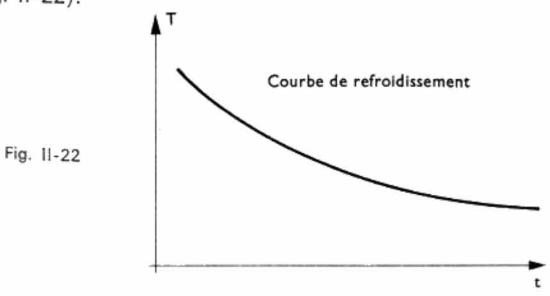


Fig. II-22

2° *Viscosité.* — Plusieurs tentatives ont été faites pour trouver une relation viscosité apparente-température ; elles se sont avérées beaucoup moins aisées que pour les polymères cristallins.

On a proposé une relation se présentant sous la forme suivante :

$$\lg \eta = \Phi^*\,(T) + F\,(p) + A$$

en appelant : $\Phi^*(T)$, une fonction de la température seule, $F\,(p)$ une fonction du nombre de segments de chaîne ; et A, une constante.

Influence du nombre de segments p. — Bueche a montré en portant en abscisse lg p et en ordonnée lg η que l'on avait une variation linéaire avec une pente sensiblement égale à 1 jusqu'à une valeur de p égale à 500 ; au-delà la pente devient égale à 3,4. On a essayé d'expliquer cette remarque expérimentale en admettant qu'à partir d'une certaine longueur critique les possibilités de formation de points d'emmêlement augmentaient et que le déplacement des tronçons de chaîne ne concernait plus les chaînes uniques mais exigeait le déplacement de chaînes liées.

Par ailleurs, William, Landel et Ferry ont montré que l'on pouvait utiliser la loi des états viscoélastiques correspondants en exprimant la dépendance η — T non pas en fonction de T mais en fonction de $T - T_c$ ou T/T_c où T_c est une température caractéristique du polymère. Les températures choisies ont été T_v ou T_S ($T_S = T_v + 50$ °C). La fonction $\Phi^*(T)$ est alors remplacée par une fonction $\Phi(T - T_S)$. La relation établie par William, Landel et Ferry est alors :

$$\lg \eta\,(T) = 3{,}4 \lg p - \frac{8{,}86\,(T - T_S)}{101{,}6 + T - T_S} + A$$

Nous avons parlé au début de ce paragraphe de viscosité apparente car la viscosité qui est mesurée est une fonction du gradient de vitesse. Les polymères fondus sont des liquides viscoélastiques, présentant un certain nombre de caractéristiques, sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir et qui présentent un grand intérêt si nous considérons les méthodes de mise en œuvre de ces matériaux. Par ailleurs leur compressibilité n'est pas négligeable.

3° *Compressibilité.* — Tous les corps sont compressibles ; on peut définir un module en compression de volume ou module d'élasticité cubique, qui est l'inverse de la compressibilité thermodynamique : χ

$$B = -\,V(\delta_p/\delta_v)_T$$

pour un gaz idéal à la pression atmosphérique :

$$B = 101{,}3\,.\,10^3\ \text{N/m}^2$$

La plupart des liquides à la pression atmosphérique conduisent à des valeurs environ 10^4 fois plus grandes et les solides les moins compressibles (le diamant, le rhodium, le tungstène et l'iridium) donnent des valeurs de B égales à 10^{12} N/m² ; pour les plus compressibles, les valeurs sont voisines de celles des liquides. Le module des liquides et des solides varie peu avec la pression et la température. Le module du chlorure de sodium passe par exemple de $30\,.\,10^9$ N/m² à 0 K à $24\,.\,10^9$ N/m² à 293 K.

Aux très hautes pressions, on a la surprise de constater que tous les liquides organiques se comportent sensiblement de la même façon. Quand la pression passe de 1 à 20 000 atmosphères leur volume diminue de 20 à 30 % ; elle atteint 36 à 39 % à 50 000 atmosphères.

Les hauts polymères fondus sont plus compressibles et Maxwell a montré que le polystyrène, par exemple, subissait une variation de volume $\frac{\Delta V}{V}$ d'environ 12 % à 170 °C quand il était comprimé de 1 à 1 500 atmosphères.

1.4. Composés macromoléculaires linéaires cristallins

1.4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques à la température ambiante. — Les composés macromoléculaires linéaires cristallins sont des corps généralement translucides (transparents en couches minces) ; leurs masses volumiques sont comprises entre 0,9 et 2,3 g . cm⁻³ (voisines de 1 pour les polyoléfines ; la masse volumique la plus grande est celle du polytétrafluoréthylène). Leurs coefficients de dilatation linéaire sont compris entre $12\,.\,10^{-5}$ et $30\,.\,10^{-5}$ K⁻¹.

Fig. II-23

Variation de la contrainte σ en fonction de l'allongement ε

Les courbes de traction à la température ambiante conduisent uniquement (fig. II-23) à des diagrammes, avec ou sans seuil d'écoulement nettement marqué montrant un grand allongement compris entre 100 et 500 %. Le module d'élasticité est compris entre 50 et 350 daN/mm². Les diagrammes sans seuil haut correspondent aux corps les moins cristallins. Pour un polymère cristallin donnant un diagramme avec seuils haut et bas, l'écart entre les contraintes aux seuils haut et bas, diminue jusqu'à disparaître dans plusieurs cas:

a) quand on passe d'un polymère recuit à un polymère trempé;

b) quand on passe des polyamides desséchés à des polyamides humides;

c) quand on diminue la vitesse de sollicitation.

Au premier de ces deux diagrammes nous pouvons associer un thermogramme identique à celui que nous avons déjà vu et qui permettrait de montrer un refroidissement généralisé de faible amplitude, suivi d'un échauffement notable et localisé. Nous avons mesuré de cette façon, que la température du front d'écoulement atteignait 100 °C pour du polyéthylène haute densité.

L'éprouvette se déforme avec une striction nettement visible, pendant qu'un front d'écoulement se déplace, suivi quelquefois par l'autre, et il y a alors un nouveau seuil haut; quelquefois les deux fronts se déplacent en même temps à partir du seuil d'écoulement initial. Assez souvent la force augmente à la fin de la déformation et il arrive qu'une nouvelle striction se forme dans la première. Dans tous les cas, une décharge montre que la déformation résiduelle est très importante. **Le produit résultant** a des propriétés très différentes de celles du produit initial: allongement faible, contrainte de rupture plus grande.

On obtient quelquefois aussi des diagrammes présentant un **point d'inflexion,** c'est le cas en particulier du polyéthylène basse densité. Les contraintes et le module sont alors plus faibles, l'allongement est très grand et la déformation partiellement réversible.

Dans ce dernier cas, l'éprouvette subit une déformation généralisée, **sans striction,** comme dans le cas d'un élastomère.

1.4.2. Influence de la température

1° *Essais de traction* (fig. II-24). — Si l'on fait des essais de traction à différentes températures, on trouve, à basse température, des courbes de traction du type I, puis des courbes du type II et ensuite, souvent (mais pas toujours), des courbes du type III.

Si l'on porte en ordonnée la contrainte au seuil ou la contrainte de rupture et en abscisse la température, on obtient un diagramme (fig. II-25), sur lequel il est possible de définir une zone de fragilité, une zone de plasticité (où l'on trouve des diagrammes du type I) et une troisième zone

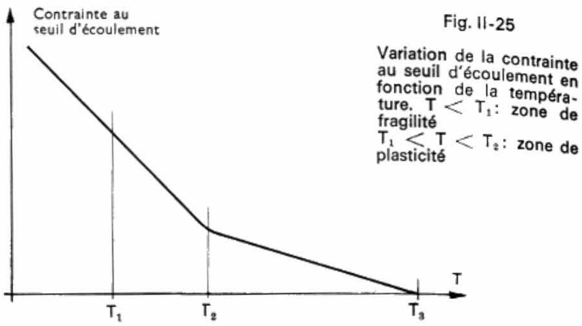


Fig. II-25

Variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction de la température. $T < T_1$: zone de fragilité
$T_1 < T < T_2$: zone de plasticité

où les corps peu cristallins donnent des diagrammes du type III et les polymères très cristallins des diagrammes du type II. Ces zones sont délimitées par trois températures critiques T_1, T_2, T_3;

- T_1 a la même signification que pour les polymères amorphes;
- T_2 correspond à la température de transition de la partie amorphe;
- T_3 correspond sensiblement à la température de fusion.

2° *Variation du module de relaxation en fonction de la température.* — La courbe lg $E_r(10)$ T est beaucoup plus aplatie que la courbe correspondante pour les polymères amorphes; elle tombe brutalement à une température voisine de la température T_3 que nous avons vue.

À titre d'exemple, le graphe de la figure II-26 montre cette variation pour du PS atactique et isotactique, c'est-à-dire deux produits respectivement amorphe et cristallin.

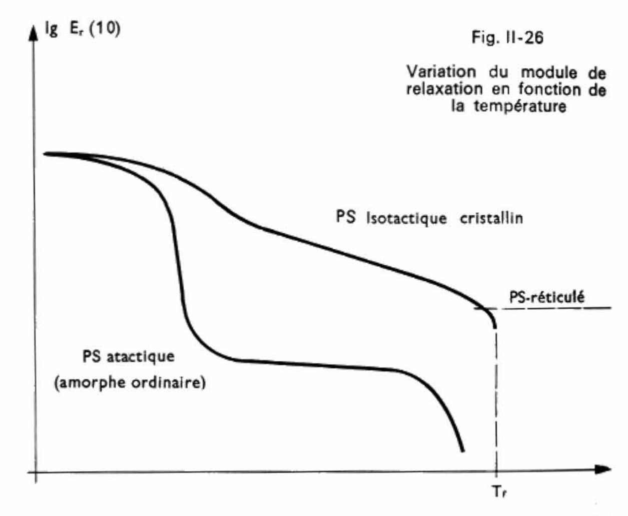
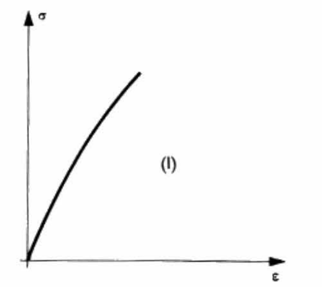
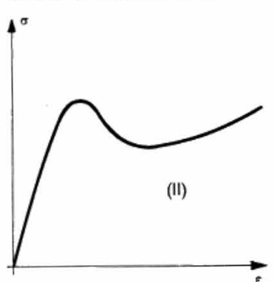


Fig. II-26

Variation du module de relaxation en fonction de la température

La création de points de fixation à l'intérieur de la structure macromoléculaire, en établissant des liaisons chimiques entre les chaînes, entraîne après T_f l'apparition d'un état caoutchoutique. La réticulation du polyéthylène par l'action du peroxyde de dicumyle ou par irradiation en est un exemple. Des gaines rétractables par recouvrance thermique sont fabriquées de cette façon; pour la même raison, on irradie quelquefois des profilés de polyéthylène extrudés, en particulier des gaines de câbles électriques, à la sortie des extrudeuses. Juste avant T_f les polymères cristallins manifestent des propriétés caoutchoutiques. Les polymères cristallins non réticulés passent quelquefois de





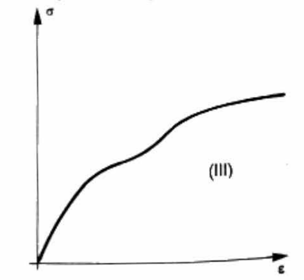


Fig. II-24 — Diverses courbes contrainte-allongement d'un polymère cristallin porté à différentes températures

l'état solide à l'état liquide dans un intervalle de températures de quelques degrés : c'est le cas des polyamides. Le formage des produits semi-finis en polymères cristallins, qui devra se faire à des températures très voisines de T_f, est donc beaucoup plus délicat que celui des polymères amorphes.

3° *Méthodes de détermination de T_f*

a) *Examen à l'aide d'un microscope à platine chauffante.* — À la fusion, le polymère devient transparent. La détermination de la température à laquelle le matériau devient transparent est plus facile en lumière polarisée.

b) *Spectre de diffraction des rayons X à température variable.* — La fusion se traduit par la disparition des anneaux cristallins.

c) *Dilatométrie cubique.* — On a déjà vu que l'enregistrement de $\frac{1}{\rho}$ par dilatométrie cubique conduit à une courbe qui permet de définir la température de fusion.

d) *Analyse thermique.* — Le refroidissement d'un échantillon porté à une température supérieure à T_3 conduit à une courbe température-temps qui n'est plus une exponentielle régulière, comme c'était le cas pour les polymères amorphes, mais qui présente un palier à la température de fusion.

La même détermination peut être faite pendant la fusion ou la solidification, en faisant des mesures thermiques différentielles.

4° *Températures caractéristiques*

Polymères	T_1	T_2	T_3	Vitesse de déformation % par minute
Polyoléfines				
PE	—101, —97	10	100	80
PE haute densité	—21, +5	60	125	80
PP	—20, —1	60	150	80
Polyamides				
PA 6-6		51	250	40 s
	—73, —66	28	250	40 (65 % HR)
PA 6	0, +18	46	220	40
PA 6-10 . . .	—32	50	220	40
PA 11		50	175	40
Polytétrafluoréthylène	—100, —82	28	300	80

L'examen du tableau ci-dessus nous incite à faire les observations suivantes :

Influence de l'indice d'interaction hydrogène sur la température de fusion. — Les températures de fusion élevées et les caractéristiques mécaniques intéressantes des polyamides sont associées aux liaisons hydrogène existant entre l'hydrogène d'un groupement — CONH — et l'oxygène du groupement correspondant de la molécule voisine. Les probabilités de formation des liaisons hydrogène sont associées aux probabilités de coïncidence des groupements — CONH —, qui dépendent elles-mêmes des longueurs des tronçons paraffiniques. On appelle indice d'interaction hydrogène le nombre de liaisons hydrogène pour 100 atomes de carbone (fig. II-27).

5° *Polymères cristallins fondus. — Théorie d'Andrade.* — Andrade tenta le premier, en 1930, de calculer la viscosité des liquides à partir de considérations théoriques.

Il se représentait chaque molécule en vibration autour de sa position d'équilibre, à une fréquence élevée, et attribuait la résistance à l'écoulement à un transfert de quantité de mouvements d'une couche à l'autre, chaque fois qu'une molécule avait diffusé jusqu'à la molécule voisine, après avoir fait environ cent oscillations. Cette théorie le conduisait à proposer une relation qui a été correctement vérifiée pour les liquides mono-atomiques (métaux liquides, argon) mais s'est avérée insuffisante pour les milieux où interviennent des forces de Van der Waals importantes et des structures dissymétriques.

Pour tenir compte de l'influence de la température sur la fréquence de l'agitation thermique et par suite sur le transfert des quantités de mouvements résultant des collisions, il envisagea d'exprimer la viscosité η au moyen de l'équation suivante :

$$\eta = A \cdot e^{E/RT} \qquad (A = \text{Cte})$$

en appelant E l'énergie d'orientation, plus souvent appelée « énergie d'activation », R, la constante des gaz parfaits et T la température absolue.

Cette relation peut aussi s'écrire :

$$\ln \eta = \ln A + \frac{E}{RT}$$

Fox et Flory ont montré que, pour un corps donné, l'énergie d'activation E était constante et que l'expression précédente pouvait être mise sous la forme suivante :

$$\lg \eta = \frac{B}{T} + CM^{1/2} + D$$

en représentant par B, C et D des constantes, par M, la masse moléculaire moyenne du polymère et par T, la température absolue.

Dexter et Képès ont trouvé des valeurs de E comprises entre 8 et 15 $\text{kcal.deg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ pour un polyéthylène basse densité.

Le diagramme de la figure II-28 correspond aux courbes

$$\lg \eta = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$$

pour trois polyéthylènes de grades différents.

Tous les phénomènes entraînant un dépliement des éléments moléculaires sont liés au temps. Kovacs a montré en particulier que les mesures de dilatométrie cubique n'étaient pas indépendantes du temps (V. fig. II-29).

Inutile de préciser que les températures T_1, T_2, T_3 sont elles aussi indépendantes du temps, c'est-à-dire de la vitesse de sollicitation.

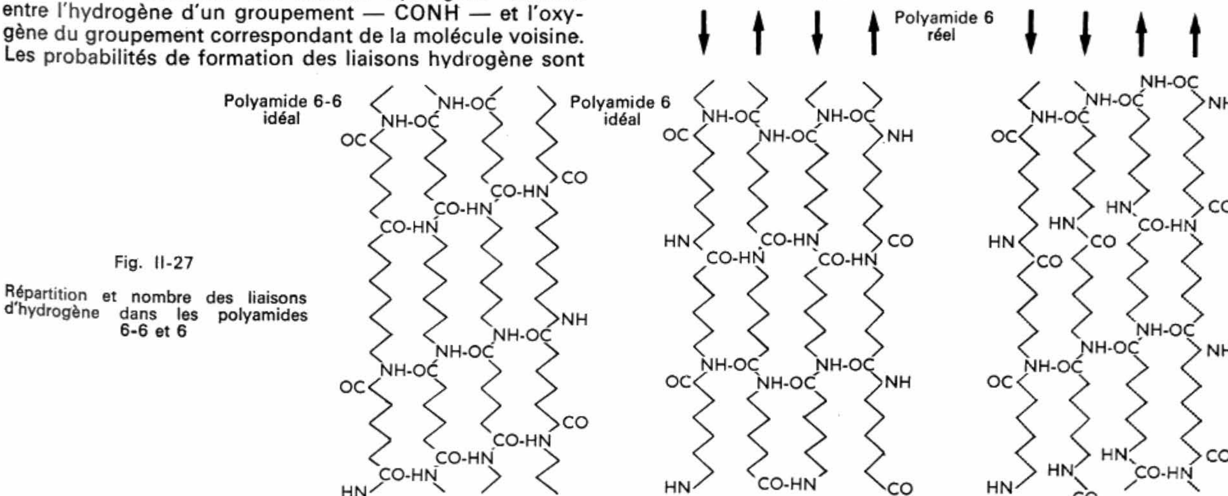


Fig. II-27

Répartition et nombre des liaisons d'hydrogène dans les polyamides 6-6 et 6

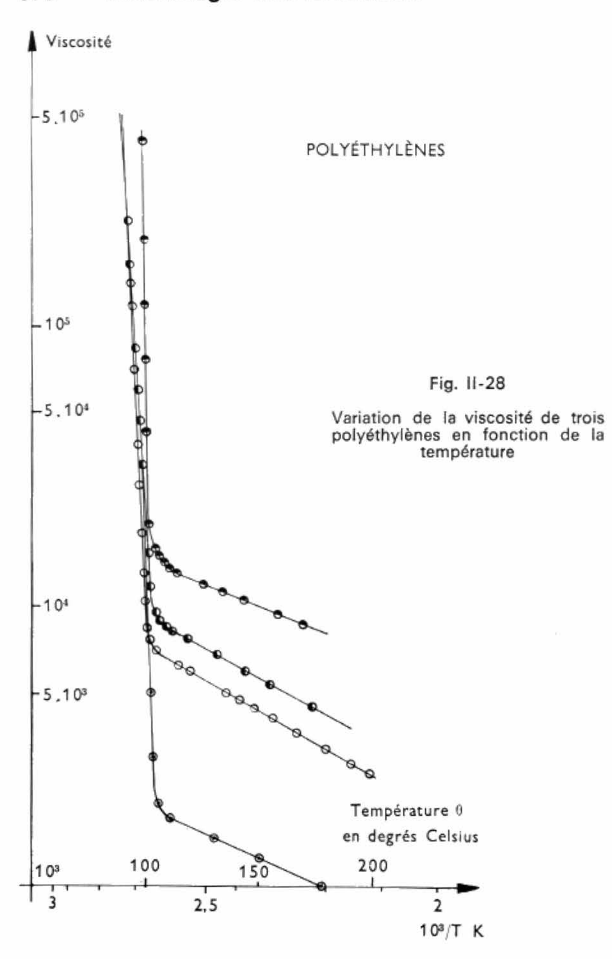


Fig. II-28

Variation de la viscosité de trois polyéthylènes en fonction de la température

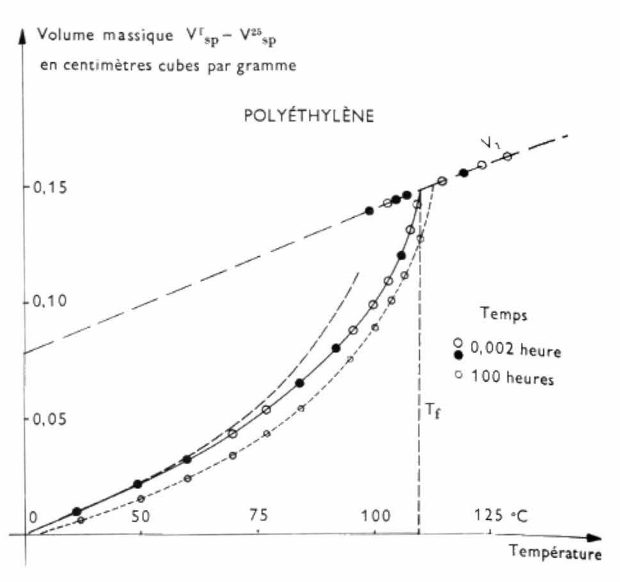


Fig. II-29 — Variation du volume massique d'un polyéthylène en fonction de la température

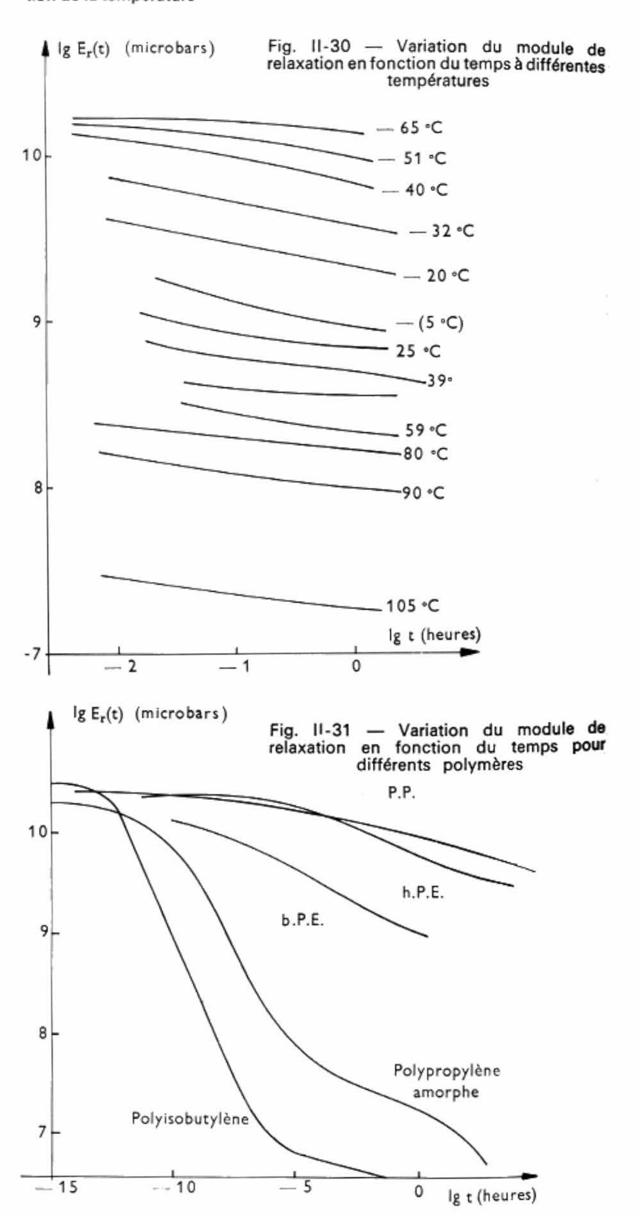


Fig. II-30 — Variation du module de relaxation en fonction du temps à différentes températures

Fig. II-31 — Variation du module de relaxation en fonction du temps pour différents polymères

1.4.3. Influence du temps (fig. II-30). — L'étude des variations du module de relaxation isotherme en fonction du temps, montre qu'une correspondance temps-température doit être envisagée avec beaucoup de prudence, seulement pour des températures très inférieures à la température de fusion et pour des temps courts, car les changements de température entraînent des modifications dans la structure microcristalline.

On a montré que pour des températures élevées et des temps assez longs, il était nécessaire de prévoir une translation verticale en plus de la translation suivant l'axe du logarithme du temps pour assurer la superposition (fig. II-31).

Déformation sous tension uniaxiale à vitesse de sollicitation imposée. — Les diagrammes de traction et les caractéristiques que l'on peut en déduire, sont très largement affectés par la vitesse de déformation, comme c'est le cas pour les polymères amorphes.

1.5. Composés macromoléculaires à deux phases. Certains composés macromoléculaires linéaires résultent de mélanges et comportent deux phases. C'est le cas, en particulier, des mélanges polystyrène-polystyrène-butadiène; PCV-polyéthylène chloré, etc. Le comportement mécanique de ces mélanges est différent de celui des constituants et il est étroitement dépendant du type de dispersion des phases.

Un cas particulièrement intéressant est celui pour lequel les deux constituants ont des températures de transition vitreuse respectivement inférieure et supérieure à la température ambiante. Le mélange conduit alors à une phase vitreuse servant de matrice à des particules sphériques élastomériques. Pour d'autres proportions, des particules vitreuses seraient dispersées dans une matrice élastomérique. La première solution est celle qui est le plus souvent recherchée industriellement.

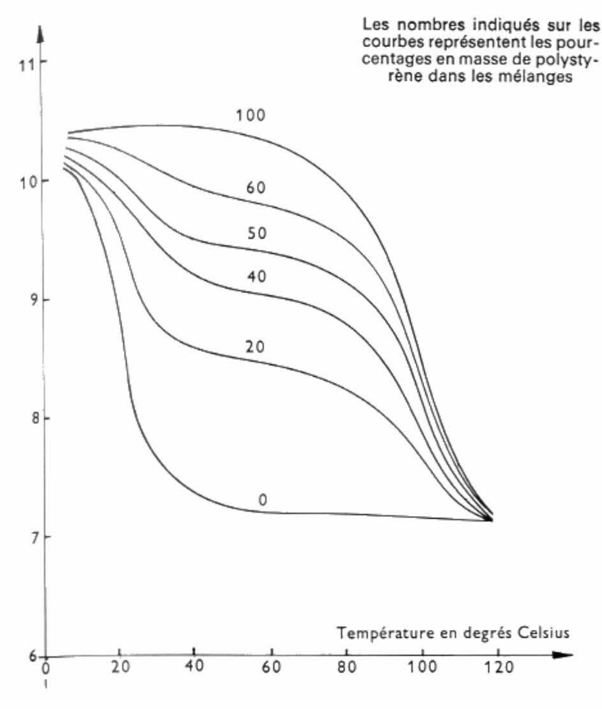


Fig. II-32 — Module E_r(10 s) en fonction de la température pour des mélanges de polystyrène et des copolymères butadiène styrène à 30-70

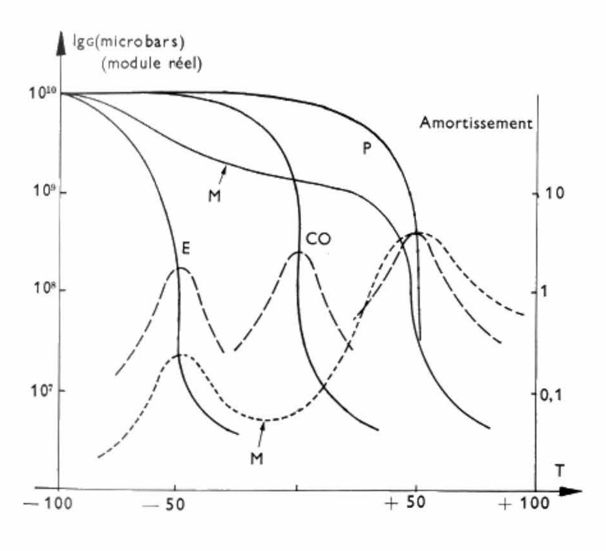


Fig. II-33

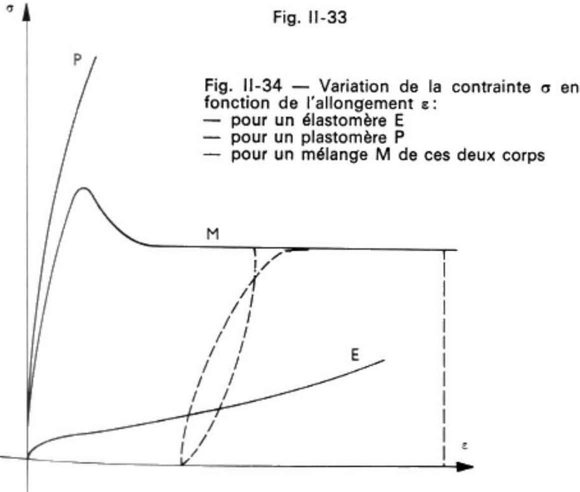


Fig. II-34 — Variation de la contrainte σ en fonction de l'allongement ε :
— pour un élastomère E
— pour un plastomère P
— pour un mélange M de ces deux corps

1.5.1. Méthodes de préparation

1° Une méthode courante consiste **à mélanger à chaud** les deux constituants, sur des mélangeurs à cylindres ou dans des mélangeurs internes (Banbury). Le résultat dépend de tous les paramètres du mélangeage (*T*, *t*, contrainte de cisaillement) et des caractéristiques des produits mélangés (caractéristiques rhéologiques, proportions, affinité de l'un pour l'autre, etc.). Le mélange peut entraîner des ruptures de chaînes résultant des contraintes de cisaillement développées dans les polymères. Ces scissions créent des radicaux libres qui provoquent la formation de copolymères-blocs.

2° Si les composants donnent des latex, on peut les mélanger sous cette forme et récupérer le mélange par coagulation.

3° Il est possible de mélanger à sec des constituants pulvérulents.

4° Le polymère ou copolymère caoutchoutique peut être dissout dans le monomère liquide correspondant à l'homopolymère vitreux et le monomère est polymérisé avec une agitation efficace. On peut ajouter un solvant inerte pour faciliter les échanges calorifiques. On peut également dissoudre des élastomères insaturés, de façon à obtenir un greffage.

5° On peut aussi polymériser en émulsion en ajoutant le monomère à un latex d'élastomère.

1.5.2. Propriétés mécaniques des mélanges à deux phases. — Il est facile de voir que le comportement des mélanges à deux phases est très différent de celui des copolymères, en reprenant tous les essais mécaniques, dont nous avons souligné l'intérêt dans les paragraphes précédents.

1° *Module de relaxation à 10 secondes.* — Les mesures de E_r (10 s) montrent que les mélanges conduisent à des courbes qui se situent entre les courbes représentatives des deux produits mélangés (fig. II-32). Le graphe E_r (10 s) — T d'un mélange, présente deux « plateaux caoutchoutiques » et deux températures de transition en relation avec les températures de transition vitreuse des deux constituants. Toutefois, un copolymère possède une seule zone de transition pour une température T_v, qui peut être calculée à partir des températures de transition respectives T_{v1} et T_{v2} des deux constituants (V. ci-dessus, § 1.3) et de leurs fractions molaires.

2° *Mesure de G en fonction de T dans un essai dynamique.* — Ces remarques sont confirmées pour des essais dynamiques aussi bien en ce qui concerne la variation de G (module d'élasticité transversal) que de la variation du frottement intérieur. On peut voir sur la figure II-33 les variations de $\lg G$ (courbes en trait plein) pour l'élastomère (E, $T_{v1} < 20$ °C), pour le plastomère (P, $T_{v2} > 20$ °C) et pour le mélange M. Nous avons représenté, à titre de comparaison, le copolymère ayant la même constitution globale que le mélange ($CO . T_v \approx 0$ °C).
Les courbes représentatives des variations de l'amortissement (courbes en pointillés) en fonction de T présentent un seul pic pour E, pour P et pour CO et deux pics pour le mélange. Chaque pic se situe à une température correspondant au point d'inflexion des courbes $\ln G$ — T associées.

3° *Essais de traction.* — Des essais de traction montrent que les mélanges pour lesquels on a une dispersion de la phase élastomérique dans une matrice vitreuse, donnent souvent une courbe de traction présentant des seuils haut et bas.
En comparant la courbe $\sigma(\varepsilon)$ du mélange à celles correspondant aux deux produits purs (fig. II-34), nous pouvons faire les remarques suivantes :

a) Le module d'élasticité du mélange M (tangente à l'origine) est peu différent de celui du plastomère (P).

b) L'allongement au seuil d'écoulement est très faible si nous le comparons à ceux des homopolymères et hétéropolymères que nous avons étudiés (3 à 6 % pour un mélange PS/PS-Bu).

c) L'énergie de rupture calculée à partir de l'intégrale de la courbe entre $\varepsilon = 0$ et ε_r (à la rupture), est

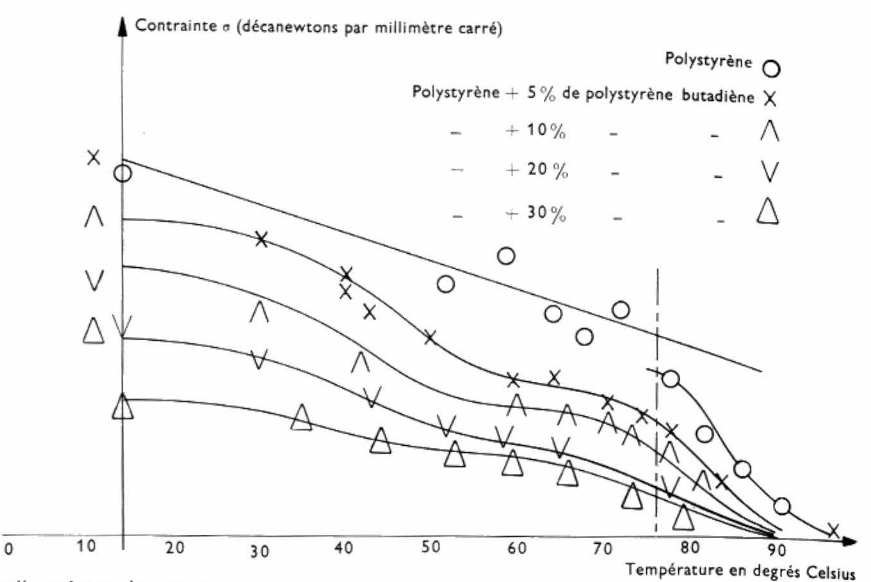


Fig. II-35

Variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction de la température pour différents mélanges polystyrène — polystyrène-butadiène

considérablement plus grande que celle nécessaire pour rompre les constituants.

d) Si la charge appliquée est supprimée après le seuil d'écoulement bas et si l'éprouvette est soumise à une nouvelle déformation, le seuil disparaît. Le second diagramme est obtenu directement en pliant fortement l'éprouvette avant l'essai.

e) L'examen de l'éprouvette montre que la déformation au-delà du seuil, s'accompagne d'une décoloration de la zone déformée : elle blanchit. Cette déformation donne lieu à une recouvrance thermique pour une température supérieure à la température de transition de la phase vitreuse.

Essais de traction à une température différente de la température ambiante. — Les courbes représentant la variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction de la température (σ — T) montrent, comme nous pouvons le voir pour le mélange PS-SB (fig. II-35), qu'il y a un point d'inflexion entre T_1 et T_2 sur chacune des courbes.

Essais de traction, influence de la vitesse de sollicitation. — La figure II-36 correspond aux courbes σ — v pour différentes températures d'essais pour le mélange PCV/PE chloré, la contrainte σ étant représentée en fonction de la vitesse de traction (exprimée en centimètres par seconde).

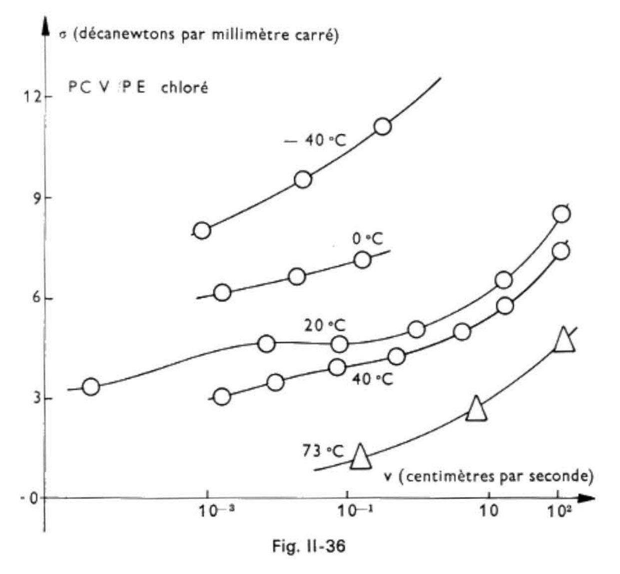


Fig. II-36

4° *Essais de choc.* — Les mélanges à deux phases sont en général beaucoup plus résistants au choc que les homopolymères ou hétéropolymères mélangés. Les « polystyrènes de choc » ou les ABS, les PCV modifiés, sont le plus souvent des mélanges à deux phases.

1.5.3. Tentative d'explication structurale des propriétés mécaniques des mélanges à deux phases. — On peut supposer que les microfissures, qui se produisent dans la matrice vitreuse de la même façon que dans les homopolymères vitreux, sont arrêtées dans leur progression par les particules d'élastomère : elles contournent les sphères au lieu de les traverser. La formation de fissures nouvelles demande une énergie supplémentaire, toute l'énergie est dissipée en microfissuration dans tout le domaine vitreux.

Des travaux récents semblent montrer que le processus de fissuration n'est pas seul responsable de la dissipation d'énergie. La zone de striction a subi une orientation moléculaire. Ce déroulement moléculaire est possible seulement pour des températures supérieures à la température de transition vitreuse de la matrice. Deux hypothèses ont été formulées :

a) Les particules élastomériques jouent le rôle de concentrateurs de tensions susceptibles d'élever localement la température, pour permettre l'écoulement.

b) Les inclusions élastomériques ont un coefficient de Poisson égal à 0,5 ; leurs déformations sont isochores. La matrice vitreuse a un coefficient de Poisson voisin de 0,35. Ces deux milieux sont intimement liés et l'isochoricité de la déformation des inclusions crée des tensions dans la phase vitreuse et déplace la valeur de T_v.

De toute façon, la résistance au choc est certainement liée à la difficulté de progression des microfissures qui résulte de la coexistence des deux phases. Les polymères cristallins, qui sont dans un sens des matériaux à deux phases (une phase cristalline, une phase amorphe), sont des matériaux peu fragiles à la température ambiante.

Remarque : Les polystyrènes de choc peuvent être fragilisés par la couche de « plax » contre-collée, pour leur donner un aspect brillant. Le « plax » est un PS ordinaire, en général bi-orienté pour améliorer sa résistance à la fissuration (épaisseur 45 μm). Des essais de choc sur du PS-SB, revêtu d'une couche de PS pur, donnent des résultats qui varient du simple au double, selon que le « plax » est dans la partie tendue ou dans la partie comprimée de l'éprouvette. À la rupture, les particules sphériques se déforment individuellement et la surface de la cassure est « poilue » quand on l'examine à l'aide d'un microscope électronique. Des lignes blanches apparaissent dans les matériaux à deux phases déformées ; elles proviennent de la différence d'indice de réfraction entre la partie fissurée orientée et la partie vitreuse non orientée. Si la dispersion est trop efficace et les particules trop petites, le mélange se comporte comme un milieu continu et les particules n'arrêtent pas la progression des fissures : le matériau n'est plus résistant au choc. La dimension minimale des inclusions est voisine de 0,01 μm pour un renforcement efficace.

De la même façon, on doit rechercher une bonne adhésion à l'interface mais s'il y a début de solubilisation d'une phase par l'autre, la résistance au choc diminue. Il faut donc une compatibilité minimale mais limitée.

Compatibilité. — Au cours du malaxage considéré à température et pression constantes, la variation d'énergie libre est :

$$\Delta F = \Delta H - T\Delta S$$

avec : ΔH = variation d'enthalpie ;
ΔS = variation d'entropie ;
T = température absolue.

Si ΔF est négatif, la solution est thermodynamiquement favorisée. Si ΔF est positif, le système à deux phases est stable.

Variation d'entropie. — Dans un malaxage ΔS est positif car cette opération se traduit par une augmentation du désordre statistique. $T\Delta S$ contribue donc à favoriser la solution. Toutefois, la variation d'entropie de configuration est extrêmement faible, plus faible en fait que pour le mélange de masses égales de liquides à faible masse moléculaire.

Variation d'enthalpie. — Elle doit avoir une très petite valeur positive, être nulle ou négative, pour que le résultat du mélange soit une solution.

L'enthalpie du mélange est une mesure de l'affinité des molécules pour leur entourage. Une valeur négative de ΔH indique une diminution de l'énergie du système au moment du mélange, c'est-à-dire que les molécules de l'un des constituants seront liées aux molécules étrangères avec une énergie de liaison intermoléculaire plus grande que celle qui existe entre elles et des molécules identiques. Cette éventualité est extrêmement rare ; elle se produit surtout lorsque des liaisons hydrogène s'établissent entre les deux constituants ; on peut supposer que c'est le cas pour les mélanges PCV-butadiène acrylonitrile, à cause de l'électronégativité du chlore et des groupements nitrile. Pour les polymères non polaires, il y aura seulement solution si les paramètres de solubilité des constituants sont sensiblement égaux.

1.5.4. Propriétés optiques des mélanges à deux phases. — Les mélanges à deux phases manquent de transparence, à cause des différences d'indice de réfraction des deux composants. Cette caractéristique limite les applications et on a essayé d'augmenter la transparence en ajustant les indices. On modifie pour cela l'un des constituants (dans le cas d'un copolymère, on peut par exemple faire varier les proportions des monomères). Cette transparence n'est malheureusement pas indépendante de la température car les indices de réfraction varient en fonction de T, en particulier celui des élastomères ; la transparence décroît donc pour des températures plus faibles ou plus grandes que celle pour laquelle les indices sont égaux (fig. II-37).

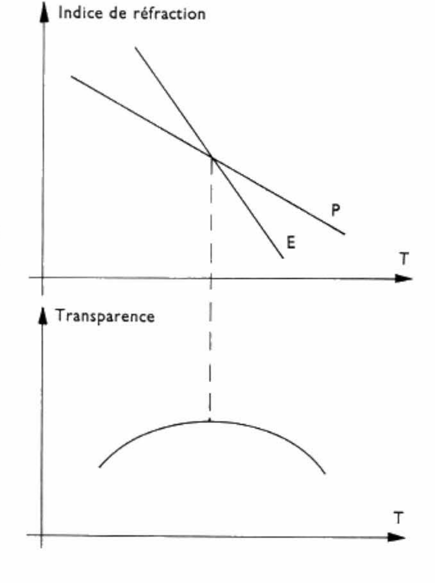


Fig. II-37

Variation de l'indice de réfraction et de la transparence en fonction de la température T
E : élastomère
P : plastomère

2. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES LIÉES À LA STRUCTURE

2.1. Dégradation thermique. — Un chauffage sous vide des composés macromoléculaires entraîne, par rupture de chaînes, une dépolymérisation qui dépend directement de l'énergie de liaison des atomes entre eux. La rupture peut se produire sous l'influence de la chaleur ou d'une action photochimique. Cette énergie de liaison dépend de toutes les autres caractéristiques de structure du matériau considéré : composition atomique, géométrie et symétrie moléculaire, empêchements stériques, caractéristiques de rotation des groupements fonctionnels, etc. Il en résulte que l'énergie de liaison devrait être considérée seulement en faisant référence à un polymère particulier.

Les valeurs données dans le tableau I possèdent donc seulement une valeur indicative. Il faut toutefois remarquer que les liaisons les plus vulnérables dans les composés organiques classiques sont les liaisons C — C, C — N, C — O, N — N, N — O et O — O (peroxydes) ; de plus, l'expérience confirme que la liaison C — C cède avant la liaison C — H et que la liaison N — O est rompue dans les dérivés nitrés.

Les liaisons C = C et C — F sont les plus stables thermiquement bien que la double liaison serve de point d'attaque pour la réaction chimique de polymérisation ou de copolymérisation.

Tableau I

Liaisons	Énergie de liaison moyenne (kilocalories par mole)	Liaisons	Énergie de liaison moyenne (kilocalories par mole)
C = C	147	O — H	111
C — C	83	O — O	33
C — H	99	Si — O	88
C — F	105	Si — F	129
C — Cl	76	Si — Cl	86
C ≡ N	147	Si — Si	42
C — N	70	Si — H	70
C = O	172	P — P	51
C — O	84	P — H	76
C — S	62	P — Cl	79
C — P	138	P — O	122
C — Si	69	As — H	59
C — Al	53	As — F	111
C — B	74	B — F	32
N — F	65	B — F	139
N — Cl	48	B — Cl	94
N — N	38	B — O	113
N — H	93	Al — O	127
N — O	73	Al — H	69
S — H	70		

On tient compte également d'autres grandeurs, par exemple :

— de la température pour laquelle le polymère perd 50 % de sa masse sous vide au bout de 30 minutes, après une mise en température de 5 minutes ;
— de la vitesse d'évaporation à 350 °C ;
— de l'énergie d'activation de la réaction de dégradation.

Ces renseignements sont très intéressants, en particulier pour les applications aérospatiales et tout particulièrement pour les problèmes d'ablation et de rentrée dans l'atmosphère terrestre. Ces problèmes sont le plus souvent abordés à l'aide de méthodes thermogravimétriques souvent suivies par des déterminations analytiques en chromatographie en phase gazeuse.

2.1.1. Décomposition des matériaux sous vide. — Les techniques aérospatiales ont provoqué le développement de l'étude des matériaux sous vide poussé. On a essayé de reproduire les conditions dans lesquelles peuvent se trouver des satellites sur orbite. On obtient facilement en laboratoire des vides proches de 10^{-6} mm de mercure

correspondant à une altitude de 200 km ; les vides compris entre 10^{-10} et 10^{-11} mm de mercure (1 000 km) sont très difficilement atteints et avec du matériel très coûteux.

L'action du vide est combinée avec celle de températures très basses ou très élevées. En effet, pendant son trajet dans l'espace, un véhicule sur orbite reçoit de l'énergie rayonnée par le soleil (q_s), de l'énergie réfléchie par la planète (Albedo) q_a, de l'énergie provenant de l'émission propre de la planète q_e.

Si : T est la température de l'engin (en kelvins), E le pouvoir émissif (égal à 1 pour le corps noir et à 0,03 pour l'aluminium poli à 100 °C), et A la constante de Stéfan-Boltzmann, nous pouvons écrire :

$$AE\,T^4 = q_s + q_a + q_e + q_{engin}$$

Ce dernier terme correspondant à l'énergie produite par le fonctionnement de l'engin. On admet que la température de l'espace est de 3 K environ. La différence de température entre les surfaces irradiées par le soleil et celles qui se trouvent à l'ombre est donc très grande. Des mesures effectuées sur *Explorer* ont indiqué + 200 °C et — 100 °C.

1° *Thermogravimètre.* — L'analyse thermogravimétrique fait appel à une thermobalance. La masse de l'échantillon est lue sur un enregistreur pendant que la matière étudiée est chauffée dans un courant d'air ventilé, dans une atmosphère gazeuse ventilée ou dans le vide. Certaines balances sont à levier, d'autres à ressort, les enregistrements (fig. II-38) sont soit photographiques, soit à plume.

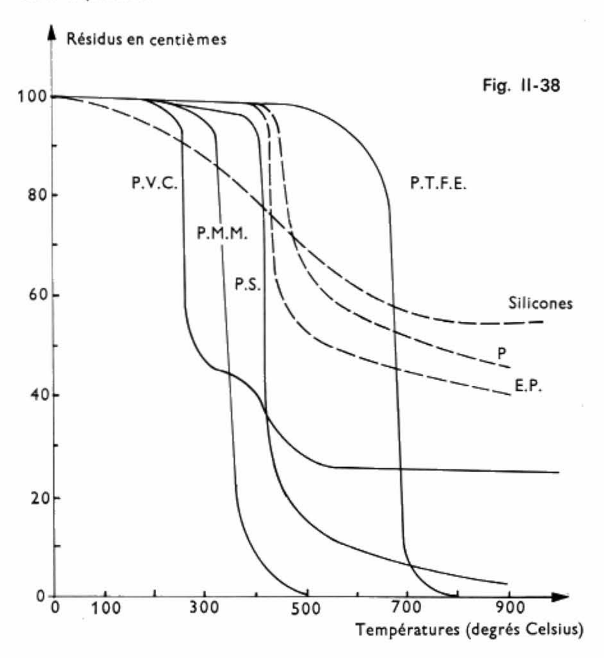


Fig. II-38

On retient en général comme critère de décomposition une certaine perte en masse ou une vitesse de perte en masse.

2° *Résultats : Stabilité thermique et structure.* — En atmosphère inerte et avec des durées d'essai comprises entre une demi-heure et deux heures, des chaînes aliphatiques telles que les polyamides, PE, PS, ont un seuil de décomposition compris entre 325 et 375 °C.

L'intervention de structures aromatiques liées conduit, comme dans la mélamine formol ou les formophénoliques, à des seuils de décomposition du même ordre de grandeur au voisinage de 450 °C ; la masse des résidus à 900 °C est particulièrement grand. Cela n'est pas dû à la stabilité de la structure elle-même mais à la facilité avec laquelle elle se transforme pour former un composé carboné stable de structure identique à celle du graphite.

Les polymères aromatiques sont, en majorité, encore peu développés industriellement ; le polyphénylène par exemple a un seuil de décomposition à 550 °C et sa perte en masse est seulement de 20 à 30 % à 900 °C.

$$\left[-C_6H_4- \right]_p$$

Le perfluorophénylène est encore plus thermostable :

$$\left[-C_6F_4- \right]_p$$

La pyrolyse du polyacrylonitrile de 200 à 320 °C donne naissance à un polymère cyclique ayant la formule suivante :

```
   \    CH2     CH2    /
    CH/    \CH/    \CH/
    |       |       |
   /C  \\  /C  \\  /C  \\
        N       N
```

Mark a signalé qu'un échantillon obtenu de cette façon et placé dans une flamme devenait incandescent mais ne brûlait pas.

Des matériaux de grande stabilité peuvent être fabriqués aussi à partir de noyaux benzéniques liés par des groupes tels que :

$$-Si(C_6H_5)_2-,\ -O-,\ -S-,\ -SO_2-,\ -N(C_6H_5)-,$$

En dehors de ces polymères, dans lesquels se trouvent des cycles, on a étudié de très près les hauts polymères inorganiques du type polyorganosiloxane ou polyorganométalloxane. Par hydrolyse et polycondensation combinées, on a abouti, non seulement à des polymères linéaires et ramifiés mais, à partir de monomères polyfonctionnels, à des molécules cyclolinéaires et cycloramifiées qui comportent dans la chaîne des atomes de silicium d'une part et d'aluminium ou de titane d'autre part ; ils présentent des motifs élémentaires tels que :

```
    R       R                  R       R
  \ |  O  / |  O \          /O\ |  O  / | /
    Si      Si                  Si      Si
    |       |                   |       |
    O       O        et         O       O
    |       |                   |       |
  / Si\   /Al\                \ Si\   /Ti\
    |  O      O               O |  O  |   \
    R                           R     R
```

La présence de ces atomes établit des liaisons du type métallique qui confère au matériau une grande stabilité thermique (température de fusion supérieure à 600 °C).

Tous les congrès de chimie macromoléculaire donnent actuellement une large place à des exposés sur ces nouveaux composés. Il est difficile dès maintenant de prévoir l'extension à l'échelle industrielle de ces nouvelles macromolécules mais il est vraisemblable, d'une part que les besoins impératifs de l'énergie atomique et de l'astronautique accéléreront leur avènement et que, d'autre part, ils poseront des problèmes épineux aux techniciens chargés de les transformer en objets finis (malheureusement, leurs propriétés mécaniques semblent assez faibles).

Pour terminer, il faut signaler que si l'on ne considère que les pertes sous vide, elles diminuent avec la masse moléculaire mais concernent le volume total du matériau et non pas seulement la surface. De plus les dégradations sous vide et à chaud sont fortement affectées par les radiations gamma, ultraviolettes, infrarouges et cosmiques.

2.1.2. Combustibilité

1° *Matériaux combustibles.* — Ils contiennent en général du carbone et de l'hydrogène (PE, PS, caoutchouc)

ou du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène (cellulosiques, phénoplastes, polyoxyméthylène).

Cette combustibilité est atténuée par les charges et particulièrement par les charges minérales qui augmentent la conductibilité thermique et, de ce fait, diminuent le gradient de température (la température de la zone où se produit le transfert de chaleur est moins grande) et augmentent la capacité calorifique de l'objet considéré.

2° *Matériaux incombustibles.* — Ils contiennent surtout du fluor, du chlore, de l'azote, du phosphore, du silicium, du calcium, de l'aluminium et du fer apportés par la résine : PTFE, PCV, Am, Silicones ou par les plastifiants : tricresylphosphate, paraffines chlorées, ou encore par les charges : oxydes (silice, alumine, oxyde ferrique, etc.), sels (sulfates de calcium ou de baryum, silico-aluminates, etc.).

3° *Matériaux à auto-extinction* (*self extinguishing*). — Ce sont, par définition, ceux qui brûlent seulement quand ils sont maintenus au contact d'une surface à température élevée ou d'une flamme. On peut conférer cette propriété aux matériaux combustibles en leur incorporant différents adjuvants : trioxyde d'antimoine et dérivés chlorés (paraffines par exemple) dont la décomposition entraîne la formation d'oxychlorure d'antimoine.

2.1.3. Ablation

1° Les progrès effectués dans le vol supersonique et dans la propulsion par réaction ont contraint les constructeurs à prendre en considération les ambiances à très haute température. Les flammes résultant de la combustion des charges de propulsions chimiques sont à des températures égales ou supérieures à 2 750 °C.

De plus, les couches limites des véhicules qui entrent à des vitesses supersoniques dans l'atmosphère d'une planète peuvent atteindre des températures proches de 5 500 °C. Dans le cas de ces environnements à très haute température, l'utilisation de matériaux traditionnels doit être exclue à cause des dégradations thermiques éventuelles et des ruptures. Une nouvelle classe de matériaux a été technologiquement mise au point, ils sont appelés matériaux de protection thermique ou « matériaux ablatifs ».

2° *Utilisation.* — Les matériaux ablatifs sont disposés à l'extérieur des structures thermiquement sensibles et les protègent des effets hyperthermiques de l'environnement.

L'ambiance provoque une érosion superficielle qui se traduit par un sacrifice contrôlé des couches externes de la protection thermique. De cette façon on arrive à limiter la température de surface et le flux de chaleur à l'intérieur du matériau.

3° *Historique.* — Les recherches ont commencé avec l'étude de météorites ; elle a permis de démontrer l'utilité de l'ablation aérodynamique mais n'a pas apporté d'autres données constructives car l'utilisation de matériaux minéraux ou métalliques était inapplicable (pour des questions de masse) aux véhicules construits par l'homme. Les premiers matériaux ablatifs ont été réalisés et étudiés en laboratoire aux environs de 1954. Ils furent d'abord employés pour la protection des tuyères de fusée à combustible solide et, dans les quelques années qui suivirent, des milliers de matériaux complexes, céramiques et plastiques furent fabriqués et essayés. Certaines conditions d'ambiances thermiques étaient impossibles à reproduire et les laboratoires spécialisés, en particulier aux États-Unis d'Amérique et en Union soviétique, se sont équipés pour mettre au point des épreuves significatives.

Parallèlement des théories étaient proposées et vérifiées expérimentalement pour expliquer le comportement des matériaux réalisés lorsqu'ils étaient soumis à de hautes températures. La mise au point de ces matériaux présentait une importance déterminante pour les organisateurs du programme aérospatial et pour les militaires. Les premiers essais de récupération de cônes ont été considérés par les États-Unis d'Amérique comme un événement suffisamment important pour que le président Kennedy présente lui-même à la télévision une ogive de fusée ayant subi l'épreuve d'un essai réel.

4° *Expérimentation.* — Les échantillons sont essayés dans la flamme d'une fusée au banc d'essai, à l'aide d'un chalumeau oxyacétylénique, à l'aide d'un four à résistance de graphite, avec un chalumeau à plasma. L'échantillon est en général placé perpendiculairement à la flamme, et on observe :

— la température sur la face opposée à l'expérimentation ;
— la vitesse d'érosion en grammes par seconde ou en millimètres par seconde ;
— la température de la surface exposée (pyromètre à disparition de filament) ;
— le flux de chaleur sur la face dorsale.

Un matériau du type formophénolique — fibres de verre — donne en coupe, après ablation, l'image figure II-39.

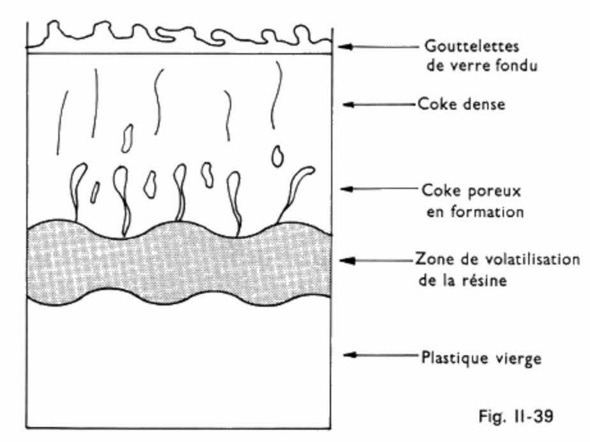
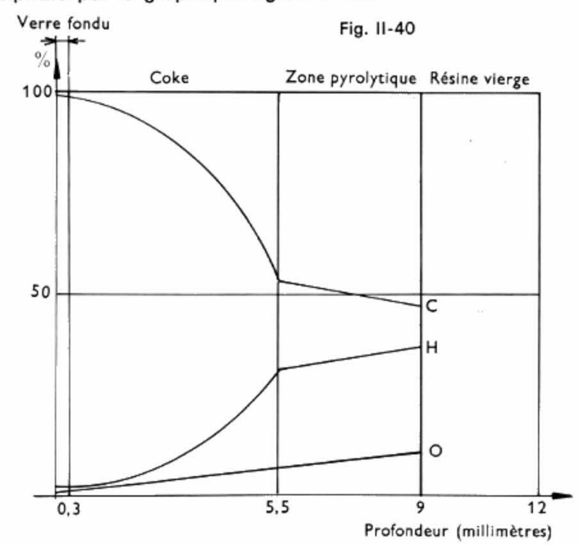


Fig. II-39

5° *Mécanisme de l'ablation.* — Le mécanisme est très discuté ; on peut raisonnablement admettre qu'un matériau de ce type se comporte de la façon suivante : la chaleur fournie à la surface est transmise difficilement à la sous-couche, à cause de la faible conductivité thermique du matériau ablatif, de sorte que la température de surface s'élève rapidement et la dégradation pyrolytique commence. Les composés organiques du complexe se dégradent en produits gazeux tels que vapeur d'eau, gaz carbonique, hydrogène, méthane, éthylène, acétylène, etc. La résine se transforme en carbone rendu poreux par le dégagement gazeux et ce coke réfractaire protège la sous-couche avant d'être arraché laissant à nu la fibre de verre qui fond, forme des gouttelettes et s'évapore.

Une analyse des différentes couches donne le résultat exprimé par le graphique figure II-40.

Fig. II-40



2.2. Solubilité. — Certaines caractéristiques physicochimiques comme la solubilité dans les solvants par exemple, dépendent de la polarité du solvant et du polymère mais sont surtout liées aux forces intermoléculaires.

Les produits les moins solubles seront, dans l'ordre décroissant de solubilité, les thermodurcis, les produits réticulés, ceux comportant des liaisons hydrogène, les polymères cristallins et les polymères amorphes.

2.2.1. Thermodurcis. — Nous avons vu que les produits ayant atteint une structure tridimensionnelle correctement construite étaient insolubles dans les solvants et que la solubilité résiduelle était un indice de polycondensation incomplète. Les structures les moins liées sont les plus sensibles aux solvants: les polyesters par exemple ne sont pas solubles mais leur surface est nettement affectée par les cétones (pour la réparation des bateaux, ou avant de les peindre avec de la peinture glycérophtalique, on passe une couche d'acétone). Les peintures contiennent souvent des solvants qui attaquent légèrement les polyesters en surface.

La réticulation n'a pas besoin d'être très poussée pour que la résine soit insoluble. Un composé macromoléculaire linéaire très soluble dans un solvant, n'est plus soluble lorsqu'il est réticulé légèrement. Il a alors une structure tridimensionnelle en résille, et entre les points de fixation, les tronçons de chaîne ne sont pas privés de leur rotation libre. Si on plonge ce matériau dans un solvant, il gonfle parfois considérablement et tend vers une forme limite liée à la forme initiale et cela sans se disperser. Staudinger a donné un exemple intéressant de ce comportement en montrant que l'adjonction de quelques grammes pour mille de divinylbenzène dans du styrène ne conduit pas à du polystyrène soluble mais à un copolymère insoluble comportant des ponts benzéniques entre les chaînes. La réticulation des chaînes de caoutchouc naturel par vulcanisation donne les mêmes résultats.

2.2.2. Polymères comportant des liaisons hydrogène. — L'énergie des liaisons hydrogène est telle que les polyamides, par exemple, sont peu solubles; cette qualité, ou ce défaut, va de pair avec leurs températures de fusion élevées et leurs caractéristiques mécaniques. Cette insolubilité ne peut pas toujours être considérée comme intéressante: elle interdit la préparation des peintures et des vernis.

Des interpolyamides préparés à partir de polyamides 6, 6-10 et 6-6 associés par deux ou par trois, avec des pourcentages différents, donnent lieu à des liaisons hydrogène plus faibles; ils ont alors des températures de fusion plus basses et sont solubles.

2.2.3. Polymères cristallins. — Spécialement les polyamides sont relativement peu solubles et le sont en général seulement à chaud. Les polyamides sont solubles dans les crésols, le polyéthylène dans la décaline ou la tétraline.

2.2.4. Polymères amorphes. — Ils sont beaucoup plus solubles; en particulier, ils sont presque toujours dans leur monomère. On tire souvent parti de cette solubilité pour coller les polymères. Certaines colles sont fabriquées par dissolution d'un polymère ou d'un copolymère dans un solvant; par exemple c'est le cas du copolymère acétate chlorure de vinyle modifié à l'anhydride maléique en solution dans la méthyléthyl cétone.

La solubilité dépend des **groupements fonctionnels** existant dans la chaîne et de la **polarité** des solvants.

Le polyacide acrylique

$$— CH_2 — \underset{\displaystyle COO\,H}{\underset{|}{CH}} — CH_2 — \underset{\displaystyle COO\,H}{\underset{|}{CH}} —$$

est soluble dans l'eau. Si l'on estérifie la fonction COO H le polymère n'est plus soluble.

La solubilité décroît quand le degré de polymérisation augmente.

Par exemple le PCV de *masse moléculaire faible* est soluble dans l'acétone et le chlorobenzène; le PCV de *masse moléculaire moyenne* est insoluble dans l'acétone et soluble dans le chlorobenzène; le PCV de *grande masse moléculaire* est insoluble dans les deux.

2.3. Influence de la constitution chimique du composé macromoléculaire sur son comportement en présence d'agents chimiques

2.3.1. Action de l'eau. — Certaines matières plastiques peuvent s'hydrolyser partiellement, c'est le cas des dérivés cellulosiques, des polyuréthannes, des polyesters et des polyamides; cette hydrolyse, qui est plus rapide dans l'eau chaude, casse les chaînes et diminue les propriétés mécaniques.

Exemple :

— Polyamides:

$$R_1 — CO — NH — R_2 \xrightarrow{H_2O} R_1COO\,H + R_2NH_2$$

Les polyamides sont également hygroscopiques, leur reprise d'humidité à saturation dépend de l'importance relative des groupements CO — NH par rapport aux tronçons paraffiniques. Les polyamides 11 sont moins hygroscopiques que les polyamides 6-6.

2.3.2. Action de l'oxygène de l'air. — Il peut exercer une action importante sur les polymères en créant des groupements carbonyles. Cette action est nette avec les polyéthylènes et le polypropylène; elle est liée à la partie amorphe du polymère. On protège les polyoléfines en leur ajoutant des anti-oxydants.

2.3.3. Action des acides et des bases fortes. — Nous pouvons envisager deux cas:

1° L'acide ou la base réagit directement sur le polymère.

2° Les ions H^+ ou OH^- catalysent la décomposition du produit comme c'est le cas pour les hydrolyses vues plus haut.

L'action des acides et des bases peut être prévue d'après la fonctionnalité des groupements existant dans la macromolécule. Par exemple le polyéthylène est insensible (groupement — CH_2 — CH_2 — CH_2 —). De même, le polytétrafluoréthylène (groupement — CF_2 — CF_2 — CF_2 —) n'est pas affecté par les acides ou les bases, même à chaud, à cause de l'énergie élevée de la liaison C-F. Seuls les alcalins (potassium et sodium) peuvent réagir à l'état fondu pour donner des fluorures métalliques, la liaison F-alcalin étant la plus énergique.

— Polyesters: beaucoup sont attaqués par les bases fortes qui provoquent une saponification.

Les polyamides sont attaqués par les acides qui entraînent l'hydrolyse du groupement amide.

Ces produits peuvent s'attaquer sélectivement à une partie de la structure comme dans le cas du polyoxyméthylène.

Les cristallites sont détruits par les acides et fragmentés en paquets parallèles, tandis que les bases semblent s'attaquer aux groupements OH terminaux et découper les cristallites dans l'autre sens (fig. II-41).

Ces conclusions ont été tirées d'études de diffractions des rayons X.

$$— CH_2—O — CH_2—O — CH_2—OH \quad | \quad OH — CH_2—O —$$

$$\longleftarrow \text{ACIDES} \quad | \quad \longrightarrow$$

$$— CH_2—O — CH_2—O — CH_2—OH \quad | \quad OH — CH_2—O —$$

$$\longleftarrow \text{ACIDES} \quad | \quad \longrightarrow$$

$$— CH_2—O — CH_2—O — CH_2—OH \quad | \quad OH — CH_2—O —$$

BASES

Fig. II-41

CHAPITRE III

PRINCIPALES MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE

On peut séparer les méthodes de mise en œuvre en deux catégories : celles qui sont réservées aux matières thermodurcissables et celles qui concernent les matières thermoplastiques. L'introduction des subdivisions que nous avons vues : matières thermoplastiques cristallines ou amorphes et produits à deux phases, ne présente pas le même intérêt pour la mise en œuvre que pour les propriétés ; en effet, quel que soit le type de plastomère considéré, le matériel et les techniques de mise en œuvre sont toujours sensiblement les mêmes. Nous allons donc examiner successivement les méthodes de mise en œuvre des résines thermodurcissables et les méthodes de mise en œuvre des matières thermoplastiques.

1. RÉSINES THERMODURCISSABLES

La mise en œuvre des matières thermodurcissables est fondée sur une modification chimique du produit transformé.

On part d'une poudre à mouler fusible, d'une résine soluble dans les solvants ou de résines liquides contenant un catalyseur ou un durcisseur et on les met en forme par différentes méthodes que nous allons décrire. Ensuite, grâce à l'élévation de température imposée à la résine, associée à l'action des catalyseurs, la résine devient solide, infusible et insoluble dans les solvants.

On fabrique de cette façon des objets, des semi-produits : plaques, profilés, etc. Les principales méthodes que nous allons examiner sont les suivantes :

— moulage d'objets par compression, transfert et injection ;
— moulage de stratifiés « haute pression » ;
— moulage de stratifiés « basse pression ».

1.1. Moulage d'objets par compression, transfert et injection

1.1.1. Compression. — Le moulage par compression consiste à mettre la poudre à mouler, pastillée ou non, préchauffée ou non, dans un moule chaud et à fermer le moule avec une force donnant une pression de moulage qui permet à la matière de prendre sa place dans le moule, de remplir l'empreinte et de continuer sa polycondensation.

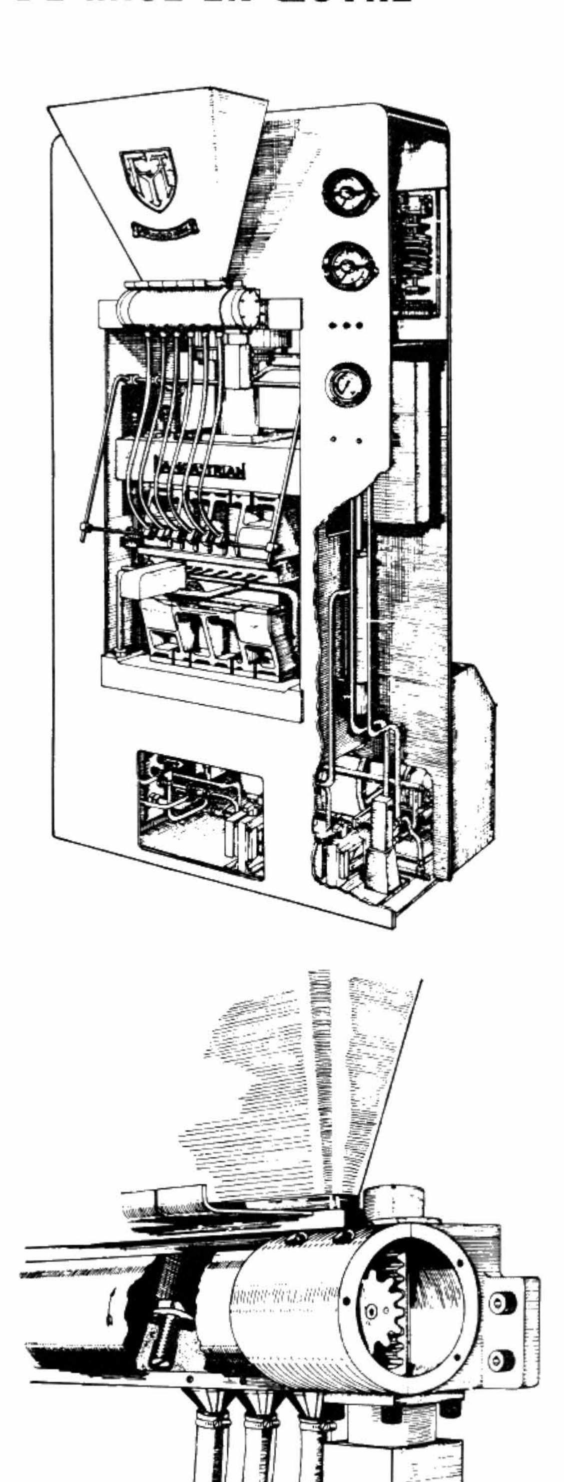
Les conditions de moulage sont les suivantes pour une P 21 (1) par exemple :

Température	Pression	Temps de cuisson
135 à 180 °C	125 à 500 daN/cm²	1 mn/mm d'épaisseur

(1) P 21 (voir plus loin) est une résine formophénolique chargée avec une farine de bois.

Cette technique de moulage est utilisée avec le même matériel pour la mise en œuvre des résines urée—formol, mélamine—formol, des polyesters, des polyépoxydes et des silicones. Seules diffèrent les conditions de moulage et en particulier la pression et le temps de cuisson.

1° *Moules de compression.* — Les pressions de moulage élevées et la possibilité de fabriquer des pièces en série, justifient la fabrication soignée des moules de compression. Ils sont en acier et comprennent d'une façon générale : **une matrice** avec une ou plusieurs empreintes dans laquelle (ou lesquelles) on place le produit moulable et le plus souvent (les pièces moulées étant habituellement d'épaisseur relativement constante) un poinçon qui pénètre dans l'empreinte en chassant le produit. On peut distinguer trois types d'association poinçon-matrice ; les moules correspondants ont été



Presse de compression entièrement automatique (*Foster Yates*). Entre la trémie et les tuyaux se trouve un cylindre horizontal dans lequel tourne un axe plein percé de logements radiaux de volume réglable ; grâce à une crémaillère, ils peuvent par rotation être mis en relation avec la trémie (ils se remplissent alors de poudre) ou avec les tuyaux (la poudre s'écoule vers les empreintes)

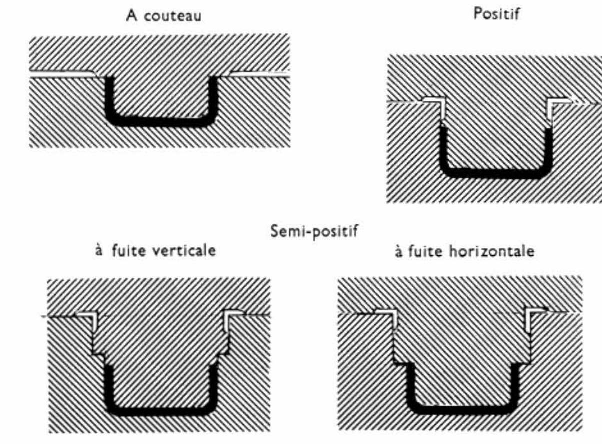


Fig. III-1 — Moules de compression

appelés : moule à couteau, moule positif et moule semi-positif (fig. III-1).

a) *Moules à couteau.* — Ce sont les plus simples dans lesquels une fuite de matière à mouler est volontairement envisagée au niveau du plan de joint.

Avantages. — Le moule est peu coûteux et d'une utilisation simple ; en particulier il exige des forces d'ouverture faibles.

Inconvénients. — Le piston étant centré uniquement par des éléments extérieurs à l'empreinte, la précision de ce centrage et, par suite, la régularité de l'épaisseur des flancs de l'objet, dépendent de la qualité de l'exécution du moule.

— Le fonctionnement normal nécessitant une fuite, les pressions de moulage sont plus faibles que celles que l'on pourrait calculer à partir de la force de fermeture et l'objet est moins compact.

— Cette fuite se traduit par une bavure périphérique, pour laquelle on prévoit souvent des logements appelés grouves ; le surplus de matière que l'on est obligé de prévoir entraîne une *perte de 10* % et même davantage. Il faut exécuter ensuite un *ébavurage*.

b) *Moules positifs.* — Dans les moules positifs, on prévoit une chambre de compression, qui est en réalité un prolongement de l'empreinte. Le poinçon est ajusté avec précision. La matière ne s'échappe que très peu, car la bavure qui se forme durcit très vite et obture toute voie de sortie.

Avantages. — Ébavurage très simple ; pression correspondant effectivement à celle que l'on peut calculer à partir de la force de fermeture et de la surface projetée de l'objet.

Inconvénients. — Moule cher à cause de la construction qui doit être très soignée ; manœuvre plus délicate ; usure assez rapide ; nécessité d'un dosage exact de la quantité de poudre.

c) *Moules semi-positifs.* — Compromis entre les deux précédents ; ils comportent une chambre de compression et une fuite volontaire, qui peut être verticale ou horizontale.

Avantages. — Ce sont les plus employés, la pression est plus grande que dans les moules à couteau et les formes sont mieux définies.

Inconvénients. — Usure du moule et poids important ; ce sont des moules coûteux.

Un moule de compression, et nous verrons plus loin que la remarque s'applique pour un moule de transfert et d'injection, comporte un certain nombre d'éléments indispensables : éléments de fixation des deux parties sur les plateaux de la presse, dispositifs de centrage d'une partie par rapport à l'autre et d'éjection de la pièce en dehors du moule. Ces éléments peuvent varier dans leurs dimensions ; ils varient peu dans leur principe, de sorte qu'une certaine normalisation des formes et des cotes (fondée sur la série Renard) peut être réalisée.

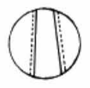
1.1.2. Le transfert. — Le moulage par transfert consiste à utiliser une **presse de transfert** sur les plateaux de laquelle on fixe les deux parties d'un **moule de transfert** et à mettre le produit moulable dans un logement cylindrique appelé **chambre de transfert.** Le moule et la chambre sont chauffés à température constante. Le piston de transfert chasse le produit plastifié par la chaleur dans la ou les empreintes du moule fermé. Il existe des presses et des moules permettant de faire :

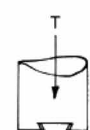
— du transfert supérieur ;
— du transfert inférieur ;
— du transfert d'angle (fig. III-2).

Les chambres de transfert doivent être calculées en tenant compte du volume des empreintes et des canaux d'alimentation. Le diamètre est défini à partir de la pression de transfert recherchée et de la force de transfert disponible.

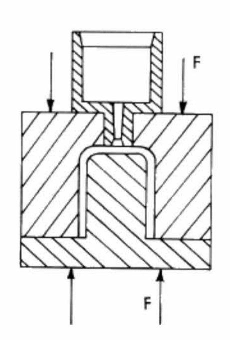
Faux transfert. — On utilise quelquefois une méthode dite de faux transfert, qui consiste à utiliser une presse de compression à fermeture de bas en haut sur laquelle on met en place un moule de transfert supérieur dont la partie haute est fixée à un plateau flottant. Le piston de transfert est au milieu du sommier de la presse. Dans ce cas, la surface de l'empreinte doit être plus petite que celle de la chambre de transfert, car la force de transfert et la force de fermeture sont identiques.

Préchauffage. — Il est rare que l'on transfère une poudre sans la préchauffer. La méthode de préchauffage la plus courante consiste à utiliser les pertes diélectriques dans un champ de haute fréquence ; cela est possible grâce à la valeur élevée de la tangente de l'angle de pertes des poudres formophénoliques. Le plus souvent on préchauffe les poudres sous forme de pastilles, mais on peut également préchauffer sans pastillage, en utilisant un récipient réalisé

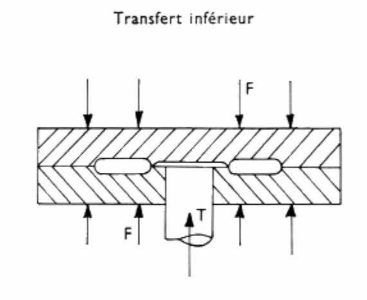




Transfert supérieur



Transfert inférieur



Transfert d'angle

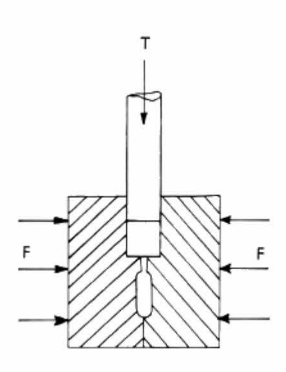
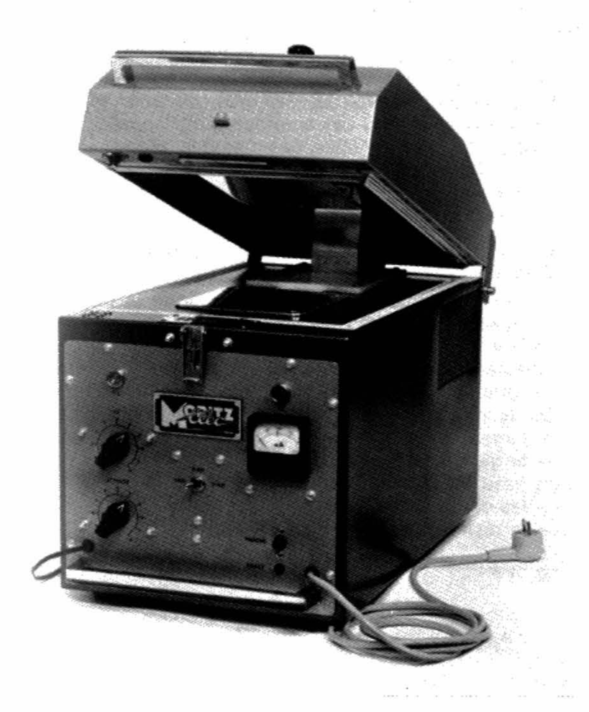


Fig. III-2 — Transfert



Préchauffeur haute-fréquence ; 400 W (*R. et J. Moritz*)

avec une plaque d'aluminium, sur laquelle on pose une bande enroulée sur elle-même, appelée « faux-col » par les praticiens. Cette bande, en stratifié silicone - fibre de verre par exemple, a une longueur et une largeur telles que, lorsque le récipient qu'elle permet de réaliser est plein à ras bord, le volume de poudre préchauffé est correct et les conditions de préchauffage sont optimales.

1.1.3. Injection. — D'autres techniques de moulage ont été étudiées, on a essayé d'utiliser en particulier des préchauffeurs puissants de 6 à 12 kW associés à des presses rapides portant des moules de transfert chauffés à 200 ou 210 °C, l'alimentation et les différentes opérations de moulage étant automatisées ; on est arrivé de cette façon à des cycles courts.

Un nouveau pas a été franchi récemment en utilisant des presses à injection à vis mobile en translation, ressemblant à celle que l'on utilise pour les matières thermoplastiques. Le dispositif de plastification est chauffé (les températures de régulation sont en général inférieures à 100 °C) et la matière, plastifiée par la chaleur produite par le travail qui lui est imposé par la vis, est chassée par la vis dans le moule chaud. Les pressions sont comprises entre 900 et 1 500 bars.

1.2. Moulage de stratifiés « haute pression »

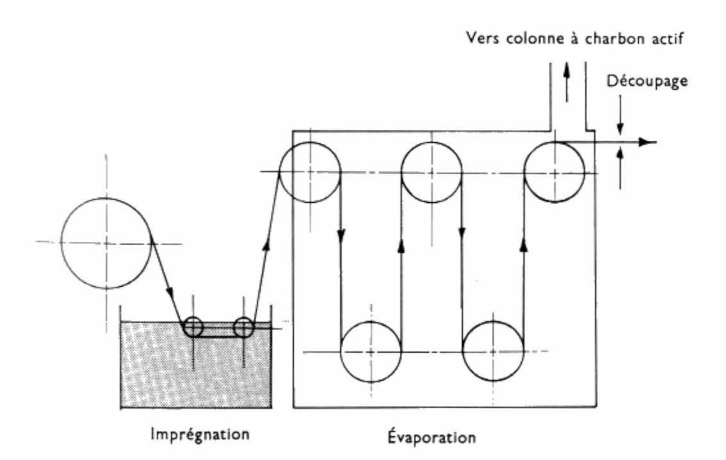
1.2.1. Principe. — Les phénoplastes, de même que les aminoplastes et les silicones, peuvent servir à imprégner des couches de tissus de coton, de verre, d'amiante de bois déroulé ou de papier kraft, etc. Les différentes couches sont ensuite mises à dimensions correctes, empilées entre les plateaux d'une presse et la polycondensation est achevée sous pression à chaud. On sort de la presse des plaques plus ou moins épaisses utilisées comme isolants électriques ou thermiques.

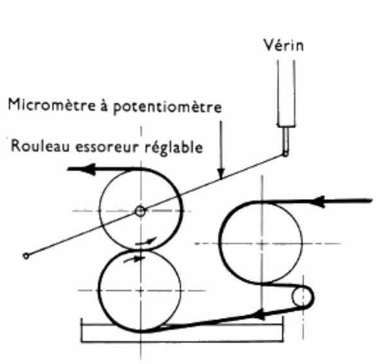
1.2.2. Imprégnation. — Les feuilles de tissus, de papier ou de bois déroulé, passent dans un bac d'imprégnation où la résine est mise habituellement en solution alcoolique (fig. III-3). À la sortie du bain, la bande imprégnée est raclée et elle passe dans un four tunnel pour évaporer le solvant à basse température ; elle est ensuite découpée aux dimensions désirées et les feuilles sont empilées en nombre suffisant. La même imprégnation peut se faire par enduction sur cylindre ; les enceintes d'évaporation sont le plus souvent réalisées avec des tuyères de soufflage d'air, qui évitent les contacts de la feuille avec un support quelconque.

1.2.3. Mise sous pression. — Les presses utilisées pour la fabrication de ces stratifiés sont des presses hydrauliques à plateaux multiples chauffés par circulation de vapeur. Les empilements de strates sont placés entre des plaques métalliques, le plus souvent en acier inoxydable ou en acier chromé. La presse est chargée à l'aide d'un chariot qui présente en même temps tous les ensembles de feuilles prêts au moulage. Les pressions exercées sur les stratifiés sont supérieures à 70 daN/cm². Les températures dépendent des stratifiés. Le temps de moulage est variable en fonction de l'épaisseur.

À titre d'exemple, pour un papier phénoplaste, on peut admettre :

pression : 120 daN/cm²,
température : 150 °C.





Enceinte d'évaporation avec tuyères de soufflage

Fig. III-3

Fabrication des stratifiés

Temps de moulage : 1 à 2 minutes par millimètre.

La proportion de résine dans le produit fini atteint 50 %.

1.2.4. Profilés. — En plus des plaques, on utilise les mêmes techniques pour fabriquer des barres, des joncs, des tubes et d'autres profilés simples.

1° *Les tubes* sont fabriqués par enroulement sur un mandrin, l'opération se fait en deux phases :
— enroulement sur mandrin à chaud et sous pression (fig. III-4) ;

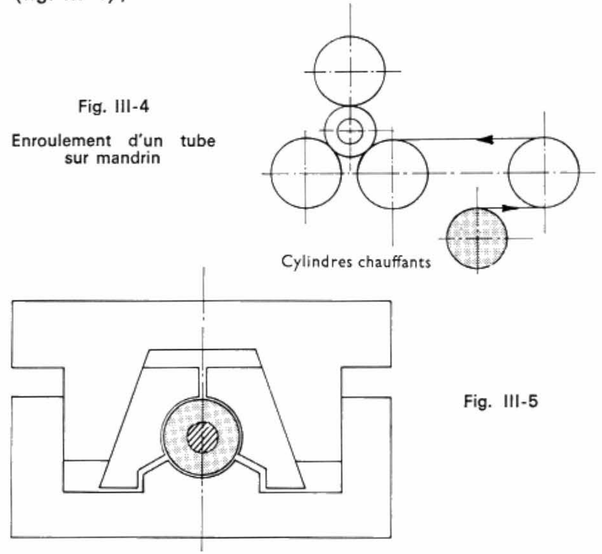


Fig. III-4
Enroulement d'un tube sur mandrin

Fig. III-5

— mise en place de l'ensemble mandrin-enroulement à l'intérieur d'un moule (fig. III-5).

Pour les tubes carrés, le principe est sensiblement le même (fig. III-6).

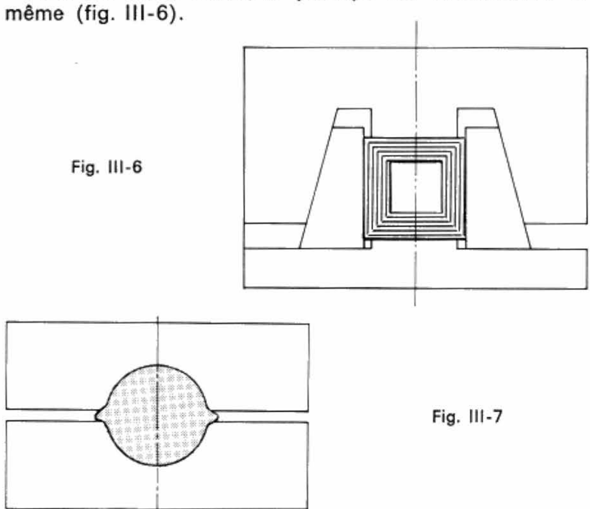


Fig. III-6

Fig. III-7

2° *Pour les joncs* cylindriques, on enroule manuellement une ébauche qui sert de mandrin et on est ramené au cas précédent. On peut utiliser aussi un moule en deux parties seulement (fig. III-7).

Agglomérés. — Des agglomérés sont fabriqués à partir de résines cellulosiques ou de bois malaxés et broyés avec une solution de résine, de façon à obtenir une pâte à 8-10 % de résine pure, que l'on presse à chaud dans des moules en acier.

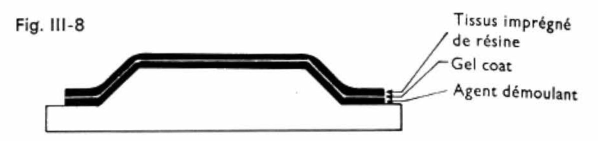
Remarque : Certains procédés brevetés associent les procédés de fabrication de stratifiés à ceux du moulage (en particulier pour les pièces de grande dimension — tables de café). On moule par compression une pièce en P 21 et avant la fin de la cuisson, on ouvre le moule pour mettre en place un papier mélaminé ; on referme le moule et on sort ensuite une pièce dont la surface semble garnie d'un « lamifié ».

1.3. Moulage de stratifiés « basse pression ». — Les polyesters, les polyépoxydes associés à la fibre de verre permettent de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des pressions de moulage, et par suite un investissement, faibles ; ces méthodes dites « au contact » sont extrêmement intéressantes, par exemple pour la **fabrication de prototypes.** Les employer pour aborder, dans des conditions concurrentielles, des marchés importants est une utopie : il faut alors faire appel à des méthodes industrielles exigeant des investissements dont le coût dépend des séries que l'on désire réaliser.

1.3.1. Méthodes de fabrication pour un nombre réduit de pièces

1° *Au contact.* — C'est la méthode la plus simple. On utilise des moules en bois vernis, en contreplaqué, en plâtre ou en Daro, en stratifiés polyesters revêtus d'un ou plusieurs agents de démoulage : alcool polyvinylique, cire, couche mince de graisse (sur moule métallique), etc. Sur le moule mâle ou femelle on met successivement :
— l'agent de démoulage ;
— le gel coat en résine pure colorée armé d'un voile ou d'un tissu léger acrylique, ou polyester ;
— les couches de tissu ou de mat choisi ;
— la résine accélérée et catalysée (fig. III-8).

Fig. III-8



Si l'on désire une belle surface extérieure on utilise un moule femelle ; un moule mâle donne une surface intérieure contrôlable.

2° *Sous vide.* — Un moule femelle dans lequel on a mis en place les éléments du stratifié est obturé par une feuille de caoutchouc, sous laquelle on fait le vide (fig. III-9). On peut encore remplir « en source » un moule dans lequel on fait le vide après avoir mis en place les tissus (fig. III-10).

3° *Au sac* (fig. III-11). — Le stratifié est poussé contre les parois du moule à l'aide d'un sac gonflé au moyen d'air comprimé.

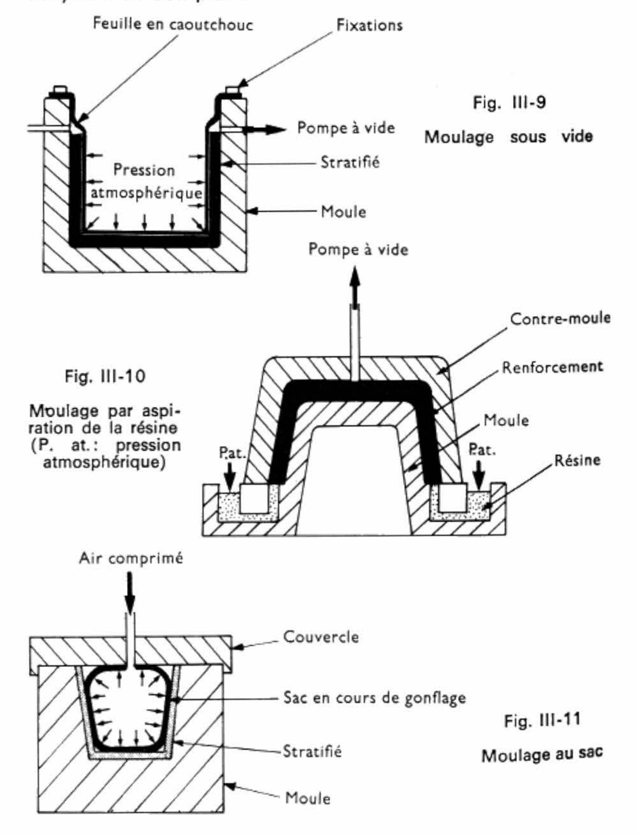


Fig. III-9
Moulage sous vide

Fig. III-10
Moulage par aspiration de la résine (P. at. : pression atmosphérique)

Fig. III-11
Moulage au sac

1.3.2. Fabrication de séries

1° *Moulage avec presse.* — Le moule chaud est en aluminium ou en acier. On met en place dans celui-ci les feuilles de tissus de verre ou de mat (V. chap. 4, § 1.4.5) ou des fibres feutrées données par une « machine à préforme » (fig. III-12), machine comportant un coupeur de

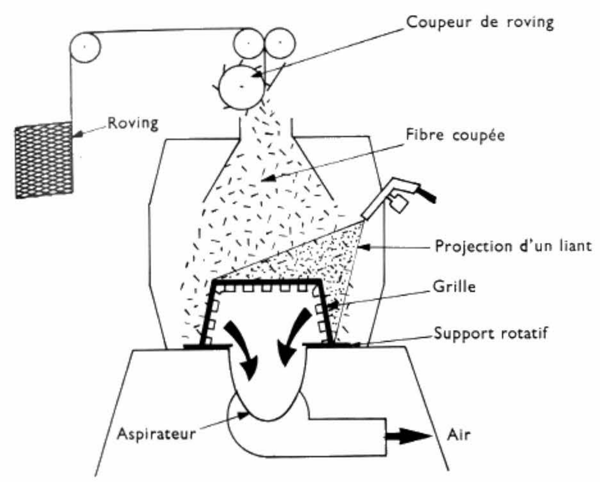


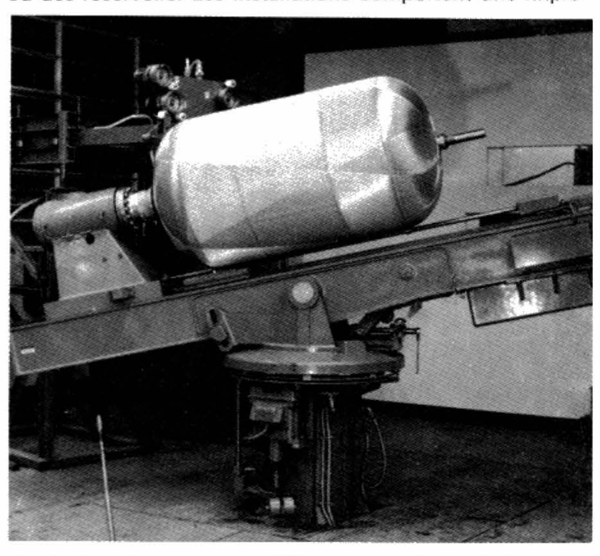
Fig. III-12 — Préformage sur grille

fibres (ou de *roving*) un dispositif d'aspiration et un support de préforme. On lie les fibres par projection de liant. On peut également préformer par cire liquide.

On peut mouler des **préimprégnés** appelés *prepregns*. Ces préimprégnés sont préparés à partir de tissus ou de mats imprégnés de résines polyesters, époxydes ou formo-phénoliques stabilisés. Les préimprégnés sont chers et doivent être maintenus en chambre froide mais ils facilitent l'industrialisation du procédé de moulage.

2° *Projection.* — On utilise du matériel comportant deux pistolets classiques alimentés respectivement en polyester-catalyseur et en polyester-accélérateur ; un coupeur de fibres alimente une buse, dans laquelle souffle un ventilateur à gros débit (air souvent chauffé). On projette sur un moule mâle ou femelle. La figure III-13 donne le schéma d'un atelier.

1.3.3. Bobinage de filaments. — On enroule un *roving* ou un ruban autour d'un mandrin pour former des tubes ou autour de formes coniques, sphériques ou cylindriques à bouts sphériques pour fabriquer des divergents ou des réservoirs. Les installations comportent une impré-



Machine à bobiner ; système « satellite » ; ici fabrication du 3e étage de la fusée Diamant (*Aérospatiale*)

gnation de roving, suivie d'un essorage ; un dispositif entraîne la forme en rotation ou les bobines en rotation autour de la forme. Le mandrin peut être rétractable et démontable, gonflable, moulé en sels solubles ou fusibles,

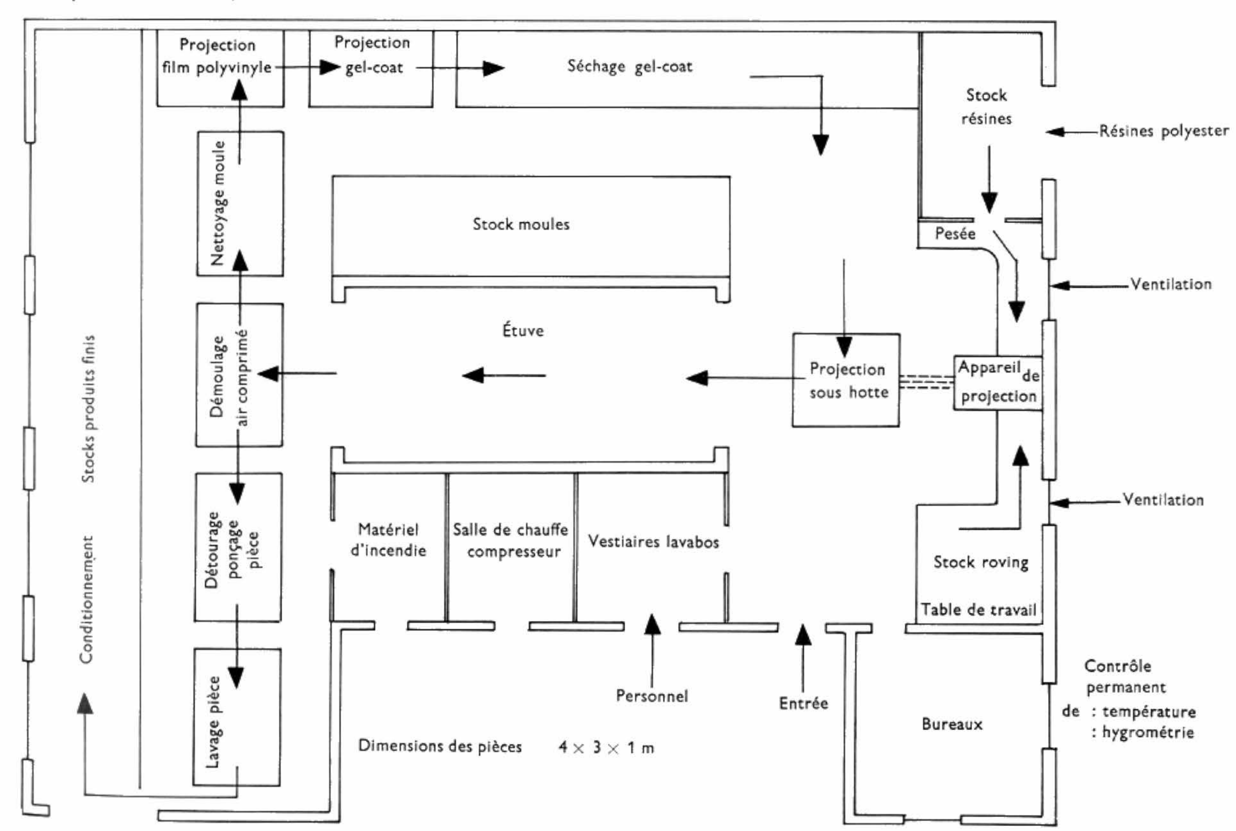
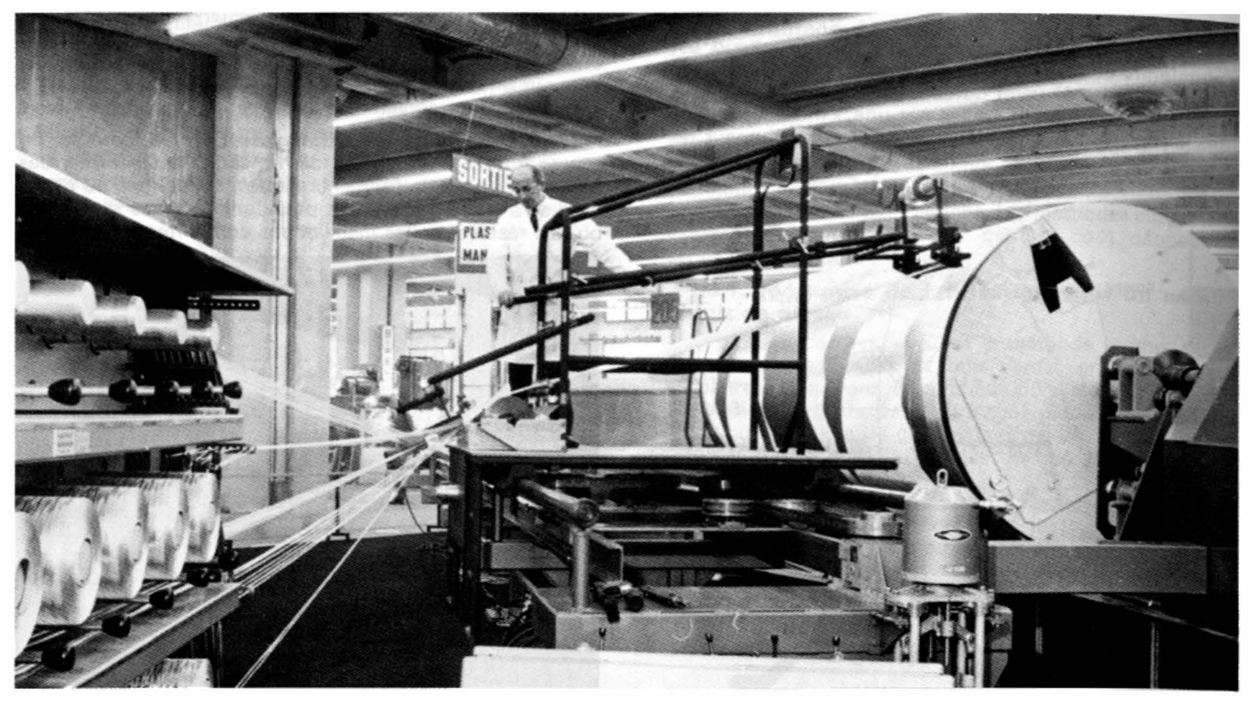


Fig. III-13 — Schéma d'organisation d'un atelier de stratifiés



Installation pour fabrication de viroles de réservoirs en résine-fibre de verre (diamètre maximal : 4,80 m ; longueur maximale : 15 m) : enrouleuse ; dérouleuse à 64 bobines de roving ; alimentation automatique en résine (*Plastrex-Manurhin*)

en alliage à bas point de fusion, en plâtre que l'on détruit après le bobinage ; il peut être constitué aussi d'une pièce moulée par centrifugation, qui reste sous le *roving* bobiné (fig. III-14).

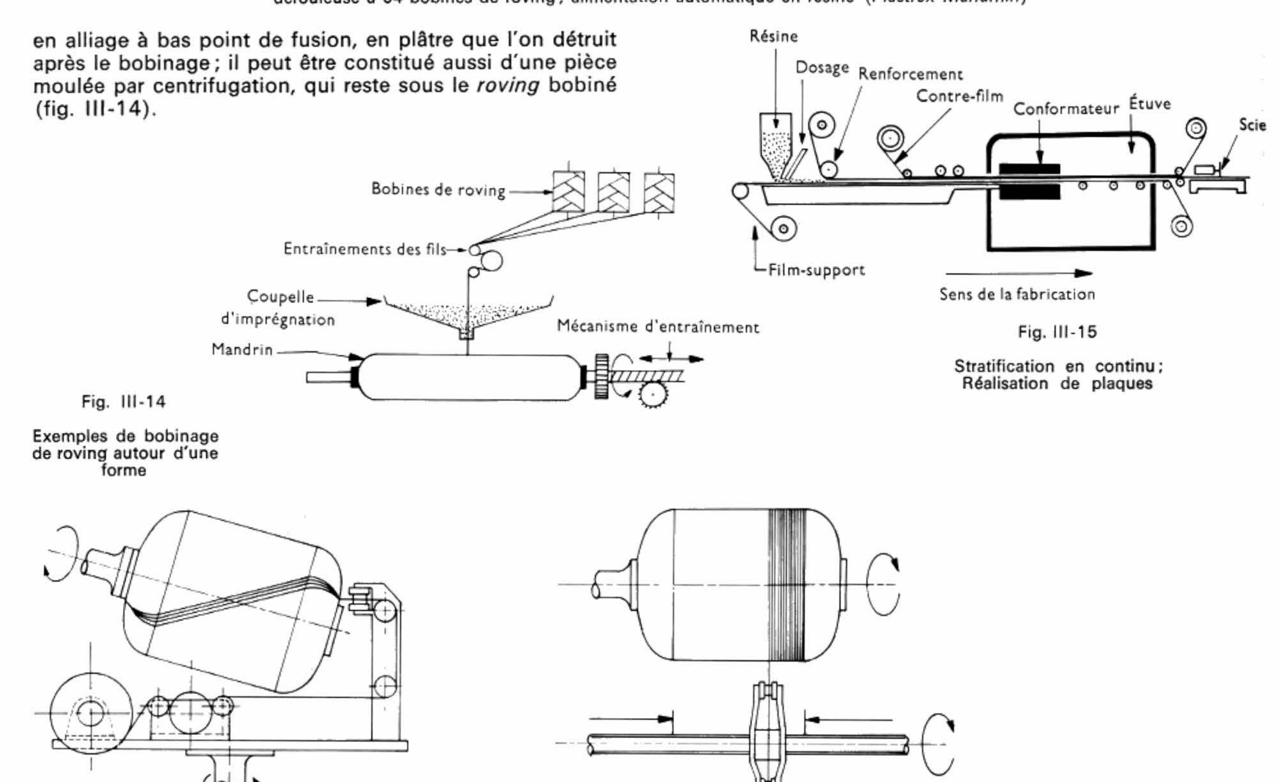


Fig. III-14

Exemples de bobinage de roving autour d'une forme

Fig. III-15

Stratification en continu ; Réalisation de plaques

1.3.4. Fabrication en continu

1° *Plaques continues* ondulées ou non, transparentes ou opaques (fig. III-15) ; on fabrique de la même façon des profilés.

2° *Extrusion.* — On pratique quelquefois (pour fabriquer des profilés) l'imprégnation de monofilaments, suivie du passage dans une filière avec essorage et passage en étuve. Le mécanisme d'entraînement de l'ensemble est placé à la sortie.

1.3.5. Sandwiches. Complexes. — Pour augmenter la rigidité des ensembles construits, on utilise des remplissages intérieurs en produits expansés : PS, PCV, polyuréthannes, en balsa, en nids d'abeille (aluminium, tissus de verre + formophénoliques). Les stratifiés peuvent être construits autour des produits expansés, ou les produits peuvent être expansés in situ (caissons de remplissage, de bateaux, panneaux cloisons).

2. RÉSINES THERMOPLASTIQUES

La mise en œuvre des matières thermoplastiques est fondée sur leur thermoplasticité.

Dans le cas du formage et de l'utilisation des films rétractables, les demi-produits, plaques ou films, sont chauffés et déformés à l'état caoutchoutique (troisième zone dans le diagramme de Tobolsky). Dans les opérations d'injection, d'extrusion, de calandrage, etc., le produit est transformé dans un état visqueux ou viscoélastique (4e et 5e zones du diagramme précité pour les polymères amorphes et après la fusion pour les polymères cristallins).

Nous allons voir successivement : le formage, l'injection, l'extrusion, le calandrage, le soudage et la technique des poudres.

2.1. Formage. — Les techniques de formage des matières plastiques sont de plus en plus couramment utilisées dans des domaines extrêmement nombreux. L'emballage de produits alimentaires ou d'objets divers fait de plus en plus souvent appel à des bacs, pots, barquettes, présentoirs, réalisés à partir de feuilles ou de plaques en matières thermoplastiques, mises en œuvre par formage. L'éclairage, la publicité, la présentation, la décoration, l'ameublement, ont tiré parti des caractéristiques esthétiques et de la transparence des plaques de polyméthylméthacrylate et de polystyrène formées. Par ailleurs, le génie chimique fait appel à des éléments en polyéthylène de haute densité ou en PCV formés et associés par soudage, pour concurrencer les métaux et, en particulier, les alliages inoxydables dans les applications en anticorrosion.

Le formage présente des analogies évidentes avec l'emboutissage des métaux en feuilles, de telle sorte que la terminologie qui lui a été consacrée est très fortement affectée par cette filiation apparente. Cette similitude dans les deux techniques est plus superficielle que profonde et un examen plus détaillé montre que les différences structurales des matériaux qu'elles transforment respectivement, entraînent des divergences fondamentales sur les plans rhéologique, thermique et technologique.

Dans les deux cas, il s'agit de transformer en objets des semi-produits : plaques, feuilles, profilés ou blocs, sans enlèvement de matière. Les formes que l'on peut espérer réaliser dans les deux cas sont tout à fait similaires. Les techniques admettent, qu'il s'agisse de métaux ou de plastiques, les mêmes limitations liées à la profondeur du formage.

2.1.1. Principe. — Si, par exemple, nous examinons le graphe traduisant la variation du module de relaxation avec la température, nous observons cinq zones, pour lesquelles le matériau présente successivement un comportement très différent (V. chap. 2, § 1.3.2).

Le formage est impossible dans la première zone, difficile dans la seconde et très facile dans la troisième. La limite inférieure de la quatrième zone, correspond au début de la fusion et c'est alors le domaine thermique, qui permettra l'extrusion, l'injection, le calandrage. La déformation de grande amplitude des flans est liée à une transformation affine à caractère entropique des macromolécules pelotonnées à l'intérieur de leur domaine statistiquement sphérique.

Le formage va donc être réalisé de la façon suivante :

a) le matériau sera porté à une température comprise dans la troisième zone ;

b) il sera déformé en mettant en œuvre des moyens qui seront examinés plus loin ;

c) il sera refroidi jusqu'à une température inférieure à la température de transition du matériau.

L'objet conservera alors la forme qui lui aura été imposée.

Ajoutons que si nous réchauffons l'objet formé à une température du domaine caoutchoutique, il retrouve exactement les dimensions et la forme du semi-produit, débarrassé éventuellement de toute tension interne préalable. Ce comportement peut paraître surprenant à un métallurgiste, qui ne peut espérer voir une pièce métallique emboutie, reprendre sa forme initiale. De ce qui précède nous déduirons des différences technologiques importantes.

Le formage des plastiques se fait après un chauffage du flan, qui n'est pas indispensable pour les métaux.

Remarquons que ce problème thermique domine l'ensemble de l'opération de formage, pour des raisons évidentes et qui résultent en particulier de la difficulté de chauffer de façon homogène des matériaux isolants. Ce problème devient aigu lorsqu'il s'agit du formage du polystyrène expansé en feuille, particulièrement isolant et particulièrement fragile ; il est chauffé à l'aide d'émetteurs infrarouges et le cycle de chauffage doit être programmé à un dixième de seconde près.

Une contrainte de quelques bars suffit pour former les plastiques, alors que le seuil critique d'écoulement plastique des métaux atteint plusieurs centaines de bars. Les forces de formage résultantes seront évidemment sans commune mesure. De plus, la réversibilité de la déformation nécessite généralement le maintien du flan à la périphérie de l'empreinte et le formage des plastiques doit être suffisamment rapide pour que le matériau soit caoutchoutique pendant toute la déformation.

La dernière phase de formage correspond obligatoirement au refroidissement de la pièce formée. Nous avons vu que le matériau mis en forme devait être refroidi en dessous de la température de transition, faute de quoi il risquait de perdre une partie ou la totalité de sa déformation. Il faut maintenir constants les efforts de formage pendant le refroidissement. C'est pour la même raison qu'il n'est pas possible de former le flan en plusieurs passes.

2.1.2. Matériaux plastiques formés. — Les polymères amorphes semblent les plus généralement utilisés. Ce sont principalement :

— le polystyrène (PS) et ses copolymères : polystyrène butadiène (SB), polystyrène butadiène acrylonitrile (ABS) ;

— le polychlorure de vinyle (PCV) et ses copolymères : acétochlorure de polyvinyle (PVAC) ;

— l'acétate de cellulose (CA) et les esters mixtes de la cellulose : acétobutyrate (CAB), acétopropionate (CAP) ;

— les méthacryliques, particulièrement le polyméthylméthacrylate (PMMA).

De plus, signalons que malgré les difficultés que nous avons notées, l'emploi des polyoléfines (polymères partiellement cristallins) est de plus en plus courant, en particulier celui des polyéthylènes haute et basse densité (PE hd, PE bd) et du polypropylène (PP).

2.1.3. Chauffage. — Le chauffage des flans avant déformation constitue une des phases essentielles du thermoformage ; en effet, le temps nécessaire à l'obtention de la température optimale de formage représente suivant les cas, 50 à 80 % de la durée totale du cycle. Un chauffage rapide augmente la cadence et diminue le coût de la mise en œuvre.

On distingue principalement deux méthodes de chauffage, choisies en fonction des séries envisagées. Les pièces donnant lieu à des moyennes et à des grandes séries sont chauffées au-dessus de l'empreinte, à l'aide de panneaux émetteurs d'infrarouge ou par conductibilité, à partir de plaques chauffantes. Au contraire, dans le cas de la réalisation de prototypes ou de petites séries, on chauffe en étuve à convection forcée ou par immersion dans un bain liquide, avant de fixer le semi-produit sur le poste de formage.

La vitesse de mise en température est une fonction des caractéristiques physiques et dimensionnelles de la pièce ainsi que de celles du dispositif de chauffage et des pertes éventuelles par conduction, convection et rayonnement. La densité de chauffe dépend essentiellement du matériau et de la surface de la pièce. Une des conditions primordiales de réussite est l'isothermie du flan, c'est-à-dire l'absence de pertes thermiques au contact du serre-flan par exemple. On compense en général les pertes au contact du châssis froid, dans le cas du chauffage par infrarouges (qui est le plus courant) en disposant un réflecteur, comme le montre la figure III-16. Cependant, dans certains cas précis, on essaie d'obtenir des conditions hétérothermiques pour favoriser les déformations dans certaines régions et, de cette façon, uniformiser en partie les variations d'épaisseur.

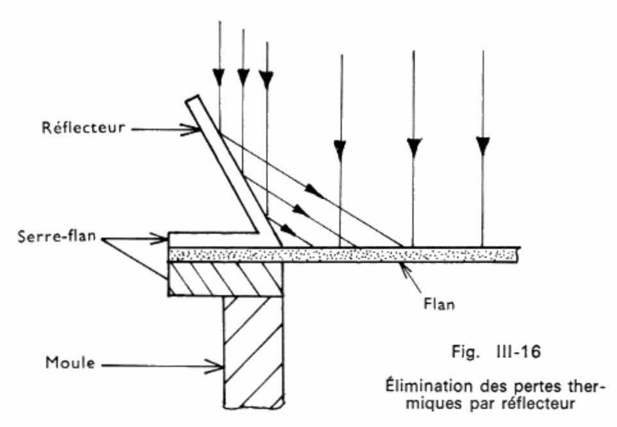


Fig. III-16
Élimination des pertes thermiques par réflecteur

Fig. III-17
Emboutissage

Fig. III-18
Poinçonnage

2.1.4. Procédés de formage. — Il existe de nombreux procédés de formage, qui découlent de quatre méthodes de base souvent combinées entre elles : emboutissage, étirage, soufflage, aspiration.

1° *Méthodes thermomécaniques.* — Ces techniques permettent des déformations de profondeur variable par emboutissage (fig. III-17) ou étirage sur poinçon (fig. III-18). Le plus souvent (fig. III-19), l'utilisation de poinçons ou de matrices incomplets autorise de plus grandes déformations en limitant les pertes thermiques ; de plus, on obtient avec ces outillages simplifiés de très bons états de surface. Il existe bien entendu des variantes de ces techniques : emboutissage sur caoutchouc (fig. III-20) ; emboutissage et découpage de flans (fig. III-21).

Dans le domaine de la réalisation de prototypes, l'ingéniosité des transformateurs a permis la mise au point de techniques simples, où le formage peut être réalisé avec de faibles moyens : emboutissage sur forme (fig. III-22) ; formage de surfaces développables (fig. III-23).

Fig. III-19
Emboutissage par poinçons et matrices incomplets

Fig. III-21 — Emboutissage et découpage de flan

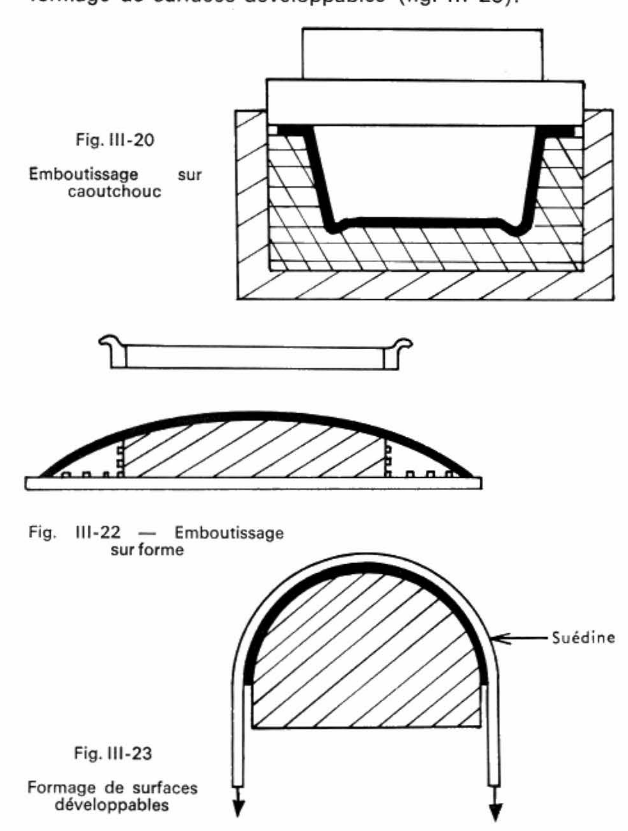


Fig. III-20
Emboutissage sur caoutchouc

Fig. III-22 — Emboutissage sur forme

Fig. III-23
Formage de surfaces développables

Fig. III-24
Aspiration

Fig. III-25
Soufflage

2° *Méthodes thermopneumatiques.* — Impossible dans le cas des métaux, le formage par aspiration (fig. III-24) ou soufflage (fig. III-25), en moule complet ou incomplet, peut être utilisé, compte tenu des faibles efforts demandés pour la déformation d'une matière thermoplastique chauf-

fée. Ces techniques nécessitent des outillages peu onéreux et d'utilisation simple, faciles à automatiser, comme le prouve la fabrication à cadence rapide des pots de laitage par exemple.

3° *Méthodes mixtes.* — Lorsque les profondeurs de formage deviennent trop importantes et que les variations d'épaisseurs des objets finis sont inacceptables, on a recours à des méthodes mixtes, qui sont des combinaisons des méthodes précédentes. Dans ce cas, le formage comprend plusieurs phases, sans refroidissement du flan. Exemples : emboutissage puis soufflage en moule (fig. III-26) ; soufflage, poinçonnage et aspiration en retour sur poinçon (fig. III-27).

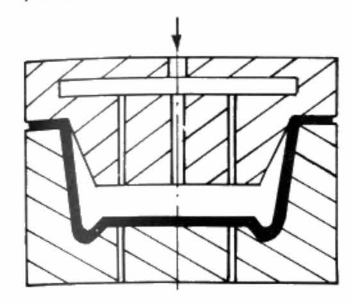


Fig. III-26

Emboutissage et soufflage en moule

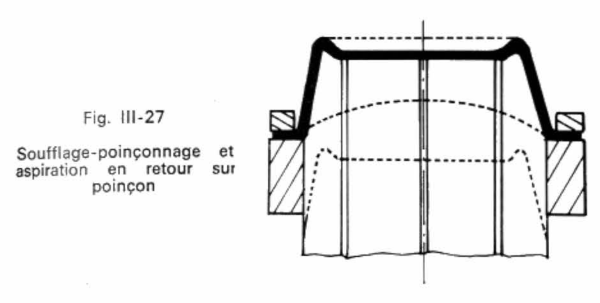


Fig. III-27

Soufflage-poinçonnage et aspiration en retour sur poinçon

4° *Méthodes particulières.* — Le façonnage et le manchonnage des tubes plastiques sont couramment utilisés pour réaliser des tuyauteries destinées au transport des liquides, en génie chimique par exemple.

Les moules en plâtre et en bois sont peu coûteux et sont réservés à la réalisation de petites ou moyennes séries.

Pour la réalisation d'ensembles chaudronnés de grandes dimensions, on peut plier les plaques ou les rouler après chauffage à l'air chaud.

2.1.5. Refroidissement et démoulage. — À la fin du formage, le refroidissement doit être rapide pour éviter le gauchissement de la pièce. Cela conduit à des retraits plus faibles, mais à des tensions internes plus importantes. On peut augmenter la vitesse de refroidissement par vaporisation d'eau, par soufflage d'air comprimé ou par circulation d'eau froide dans des canaux ménagés dans l'épaisseur du moule.

Après démoulage, les pièces doivent être retouchées à leur périphérie.

2.1.6. Conception des pièces et des moules. — Les efforts mis en jeu étant relativement faibles, on peut utiliser de nombreux matériaux pour réaliser les moules. Leur état de surface doit être soigné, pour conférer aux pièces finies un aspect convenable. On utilise couramment : le plâtre, le bois naturel ou bakélisé, les alliages légers, les aciers, les stratifiés pour les petites séries et pour des pièces dont les tolérances ne sont pas strictes. Les moules métalliques correspondent assez bien aux exigences du thermoformage en grande série ; cependant, ils risquent de refroidir trop rapidement le flan pendant le formage et on leur préfère souvent les outillages en résines thermodurcissables chargées de poudres métalliques, qui sont, eux aussi, d'un faible prix de revient.

Il faut, de plus, ménager dans tous les moules des évents d'échappement de petits diamètres ($\leqslant$ 0,5 mm) pour évacuer l'air emprisonné entre le flan formé et le moule.

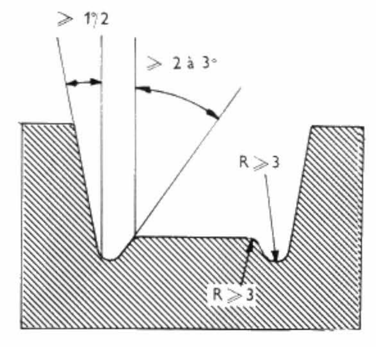


Fig. III-28

Dépouilles (les rayons de courbure R sont exprimés en millimètres)

Les coefficients de dilatation des plastiques sont généralement dix fois supérieurs à ceux des métaux, aussi les dépouilles doivent-elles être importantes, pour faciliter le démoulage (fig. III-28).

Parmi les nombreux modes de formage existants, on choisit le plus apte à fournir une pièce donnée, en fonction du matériau et de la forme, de la profondeur de l'objet, de la précision exigée, des épaisseurs des parois, du fini de la face apparente de la pièce, de la série à exécuter, du matériel et des moyens dont on dispose.

2.1.7. Défauts des pièces formées. — Le formage donne lieu à deux sortes de défauts principaux : des défauts qui découlent directement de la méthode de déformation et qui sont inévitables (variations d'épaisseur) et des défauts liés à des erreurs de mise en œuvre et à une mauvaise conception des pièces et des outillages.

Nous ne parlerons ici que des variations d'épaisseur qui sont dues uniquement à la technologie employée.

Lors du formage, l'épaisseur des plaques varie et cette variation dépend du procédé de formage. Le soufflage ou l'aspiration libre (fig. III-29) ou en moule (fig. III-30 et III-31) peut provoquer un affaiblissement important de l'objet fini dans les parties les plus éloignées du serre-flan. Au contraire, le poinçonnage amincit les parties latérales car la pièce se refroidit au contact du poinçon et se

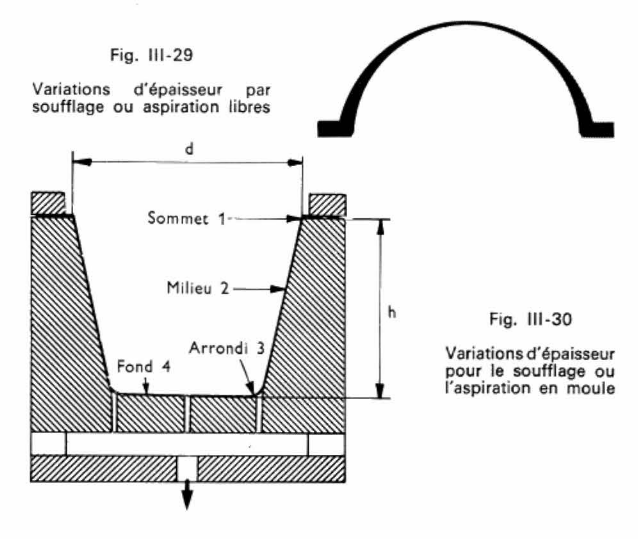


Fig. III-29

Variations d'épaisseur par soufflage ou aspiration libres

Fig. III-30

Variations d'épaisseur pour le soufflage ou l'aspiration en moule

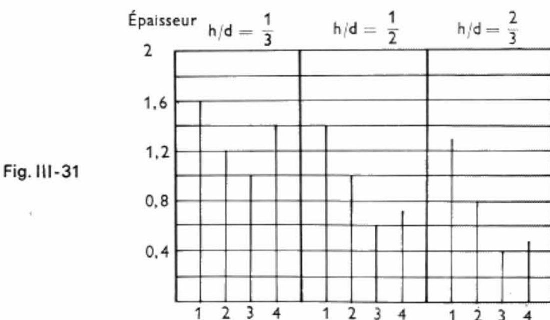
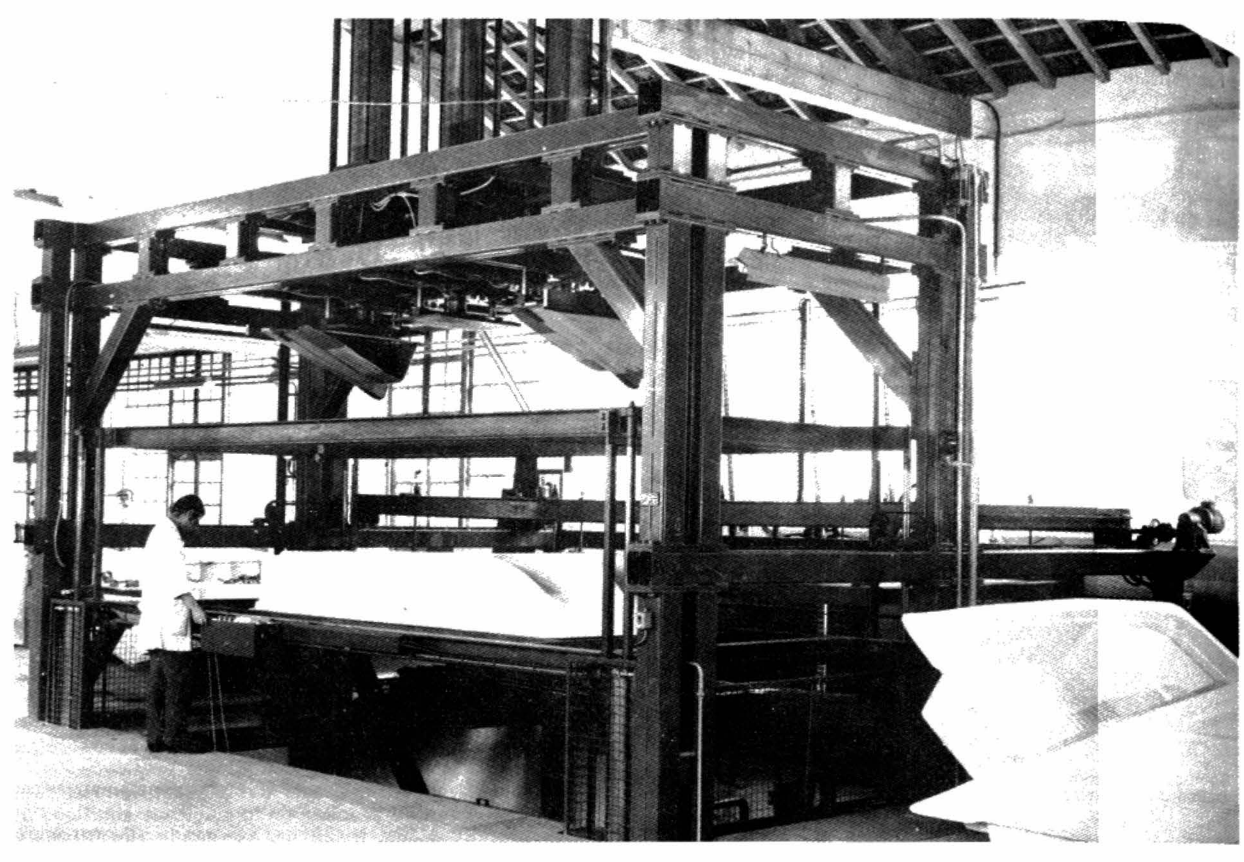


Fig. III-31



Presse à former sous vide ; format : 4,70 m × 1,90 m (*J. Bourgeois — Ets Brebion*)

déforme peu. C'est pour ces raisons que l'on combine ces deux méthodes, afin de régulariser au maximum les épaisseurs sur un objet fini. Il est évident que l'emboutissage entre poinçon et matrice, qui ne conduit pas à ces variations d'épaisseur, limite en revanche la profondeur du formage.

2.1.8. Applications du thermoformage. — Nous considérons deux techniques distinctes de thermoformage, séparées par la nature des marchés, la conception des matériels employés, l'importance des séries :
— le formage des plaques ;
— le formage des feuilles minces.

1° *Formage des plaques.* — Le thermoformage de plaques de PMMA et de PS permet de réaliser des enseignes lumineuses, des boîtes à gants, des coupoles d'éclairage, des vasques de protection de tubes fluorescents. Le formage du PCV conduit à des éléments de chaudronnerie industrielle, celui des ABS à des carrosseries, coques de bateau, capots d'appareils électroménagers, etc. Ces opérations sont généralement confiées à des entreprises ou ateliers spécialisés, qui emploient souvent du matériel manuel ou semi-automatique et, pour des séries importantes, des machines entièrement automatiques.

2° *Formage de feuilles minces.* — Les feuilles d'acétate de cellulose, de polystyrène butadiène, de PCV, etc., ou les feuilles complexes sont surtout employées pour résoudre des problèmes de conditionnement de produits alimentaires ou d'objets manufacturés. Les récipients thermoformés sont obturés par des couvercles fabriqués suivant le même procédé ou par des feuilles d'aluminium enduites d'un vernis permettant un thermoscellage. Les machines utilisées sont généralement entièrement automatiques, à grand débit, alimentées par des rouleaux de films ; elles assurent toutes les opérations de chauffage, de formage et de découpage des objets. Le travail est exécuté soit par des entreprises spécialisées, soit par les industries utilisatrices.

Une forme particulière du thermoformage, appliquée au conditionnement, mérite une mention particulière, c'est le *pelliplacage*. Le pelliplacage (*skin-pack*) consiste à former un film de 40 à 300 µm par aspiration directe sur un objet posé sur un carton enduit d'un vernis autocollant et perforé pour permettre l'aspiration. L'objet sert de moule, le carton peut être imprimé, le film est transparent. Les objets ainsi conditionnés (vis diverses, prises de courant, accessoires d'électricité ou d'électronique) peuvent souvent être fixés verticalement sur des présentoirs.

2.1.9. Formage à froid. — Il nous faut signaler les nouvelles tendances des techniques de formage, en particulier l'introduction du formage des polymères armés de tissus et le formage à froid.

Le formage à froid, surtout limité aux ABS et aux polycarbonates met en œuvre la ductilité de certains plastiques à la température ambiante : ceux-ci se comportent alors comme des métaux et peuvent être emboutis. L'outillage est conçu exactement comme celui de l'emboutissage des métaux, réalisé en acier au chrome-nickel-molybdène traité thermiquement ou en acier autolubrifiant pour le formage d'emballages alimentaires.

Le jeu entre le poinçon et la matrice est compris entre 1,03 et 1,05 fois l'épaisseur du flan. Les rayons d'emboutissage et d'extrémité de poinçon sont respectivement égaux à environ 3 et 7 fois l'épaisseur du flan. On utilise des presses à vilebrequin qui permettent des cadences comprises entre 10 et 200 coups par minute. Les pressions d'emboutissage et de serrage du flan sont inférieures à celles utilisées pour les tôles d'alliage d'aluminium.

Il est presque toujours nécessaire de lubrifier, l'huile de paraffine donne de bons résultats avec les ABS et peut être utilisée pour le marché de l'emballage. Pour l'automobile ou d'autres industries mécaniques, l'huile normale pour emboutissage convient parfaitement.

2.2. Moulage par injection. — L'injection est une méthode de moulage qui permet de fabriquer, en grande série, des objets dont la masse peut varier de quelques milligrammes à une trentaine de kilogrammes. Cette limite supérieure, qui correspond aux capacités maximales des

presses actuelles, est plus d'origine économique que technique ; il est vraisemblable que dans l'avenir, les besoins du marché justifieront la mise au point de presses de capacité beaucoup plus grande.

2.2.1. Principe. — L'injection des matières thermoplastiques consiste à chauffer le matériau de façon à le transformer en un fluide plus ou moins visqueux et à le contraindre à s'écouler sous pression à l'intérieur d'un moule refroidi. La température du produit injecté se situe, pour les polymères amorphes, à l'intérieur des quatrième et cinquième zones du diagramme lg $E_r(t)$ — T (V. chap. 2, § 1.3.2) ; la pièce n'est sortie du moule que lorsque sa température est inférieure à T_v.

Pour les polymères cristallins, la température d'injection est toujours supérieure à la température de fusion T_f du polymère.

Les cotes de l'objet sont peu différentes de celles de l'empreinte du moule malgré la température d'injection relativement élevée et malgré les coefficients de dilatation cubique très grands des matières thermoplastiques, particulièrement des polymères cristallins. Cette particularité s'explique : la matière injectée se refroidit sous pression élevée et le refroidissement se traduit par une chute de la pression interne avant que la contraction ne puisse se manifester. En plaçant à l'intérieur d'un moule un capteur de pression il est possible de tracer le diagramme : pression-température (ce dernier paramètre étant défini par le calcul en tenant compte des échanges calorifiques entre le matériau et les parois du moule) : c'est le graphe représenté sur la figure III-32.

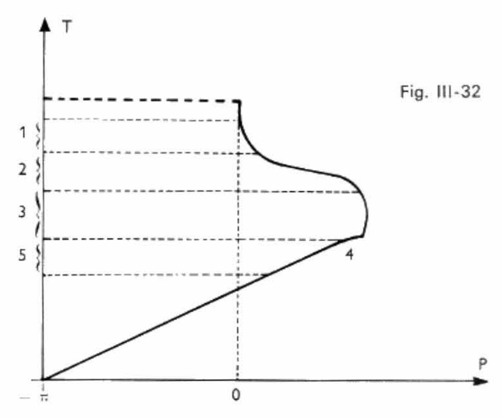


Fig. III-32

Sur ce diagramme nous pouvons définir un certain nombre d'étapes qui ont été repérées par des chiffres (de 1 à 5).

1. Remplissage du moule.
2. « Bourrage » du moule : la matière se refroidit et on continue à alimenter le moule pendant que la pression augmente.
3. Décharge : la section du canal d'alimentation est remplie par un produit qui s'est solidifié le long des parois et l'orifice de communication ne permet pas d'assurer un débit de matière suffisant pour maintenir la pression.
4. Solidification de la carotte (on appelle carotte le contenu de l'orifice d'alimentation).
5. Refroidissement, l'empreinte étant séparée de l'alimentation.

Pendant cette dernière phase, une certaine masse de matière est enfermée dans un volume constant : la variation pression-température se fait donc à masse volumique constante.

Cette variation est linéaire et, pour les polymères amorphes, nous avons l'équation d'état suivante :

$$(P + \pi)\ (V - \omega) = RT$$

en désignant par P la pression, par V le volume massique, par T la température moyenne, par R, π, ω, des constantes dépendant du polymère.

Pour des pressions plus élevées, au point 4, les masses volumiques sont plus grandes.

Dans une certaine mesure l'opérateur est donc maître de la masse volumique du matériau pendant l'injection, à cause de la grande compressibilité des polymères fondus.

2.2.2. Matières thermoplastiques injectées. — Tous les plastomères peuvent être injectés plus ou moins facilement à l'exception du polytétrafluoréthylène.

Certains composés macromoléculaires sont peu ou pas injectés ; citons les acétals polyvinyliques, l'alcool polyvinylique (dont les caractéristiques spéciales ne justifient pas souvent leur utilisation sous forme de pièces), le polytéréphtalate d'éthylène glycol, etc.

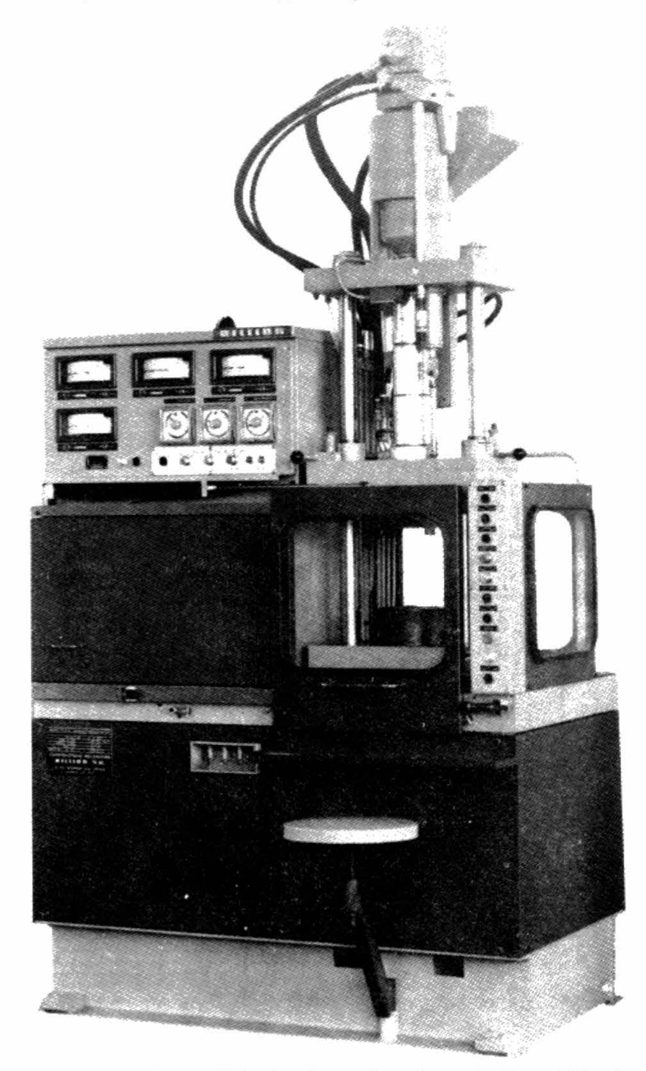
Tous les autres sont mis en œuvre par injection dans des conditions qui ne diffèrent que par les paramètres d'injection : température d'injection, pression d'injection, température du moule, durée du cycle.

2.2.3. Matériel utilisé dans l'injection. — L'injection est appliquée à la fabrication des objets en grande série car elle exige des investissements importants comportant une **presse à injection et un moule.**

La presse comporte un **dispositif de plastification et d'injection** qui est alimenté par des granulés ; il permet leur chauffage et leur homogénéisation et il assure ensuite le transfert du polymère sous pression à l'intérieur du moule. Par ailleurs, un **dispositif de fermeture** maintient le moule verrouillé pendant l'injection et permet les manœuvres d'ouverture et de fermeture du moule ; un **dispositif d'éjection** de la pièce lui est associé.

D'autres organes, liés à la **sécurité**, au **conditionnement du moule en température,** à l'**alimentation** du dispositif de plastification, sont utilisés habituellement.

1° *Presses à injection.* — Les presses peuvent être manuelles, semi-automatiques, entièrement automatiques ; l'emploi de ce dernier type se généralise.


Presse verticale pour l'injection des matières thermoplastiques (*Billion*)

Leur structure doit être conçue pour supporter des efforts qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilonewtons. La solution la plus couramment employée consiste à utiliser deux ou quatre colonnes entretoisant des plateaux rigides.

Les dispositifs de verrouillage et d'injection peuvent être associés de plusieurs façons (fig. III-33) :

— L'axe du dispositif d'injection peut être perpendiculaire aux plateaux, la direction de fermeture est donc coaxiale à la direction de l'injection.

— L'axe du dispositif d'injection peut être parallèle aux plateaux de la presse ; cette presse est appelée « presse d'angle ».

Dans le premier cas, les presses peuvent être **horizontales** ou **verticales,** les deux solutions sont couramment utilisées, mais on rencontre peut-être plus fréquemment les presses horizontales, malgré l'augmentation de l'encombrement au sol qu'elles entraînent. Certaines presses permettent le basculement autour d'un axe de rotation du dispositif d'injection et de fermeture, de sorte qu'elles peuvent fonctionner suivant le type de moule, en presse verticale, en presse horizontale ou en presse d'angle.

Ces presses peuvent généralement être munies de deux dispositifs d'injection pour faire des injections bicolores.

a) *Dispositif d'injection.* — Ce dispositif d'injection est chargé de transformer des granulés de matières thermoplastiques, préchauffées ou non, en un milieu continu viscoélastique correspondant au matériau fondu. Ce produit est ensuite chassé dans le moule au moyen d'un piston.

Pendant très longtemps, plastification et injection sont faites à l'aide du même dispositif, comprenant un cylindre métallique chauffé par des colliers extérieurs et terminé à une extrémité par un nez ou « buse » ; il est alimenté en granulés par l'intermédiaire d'un système mécanique de dosage placé à son autre extrémité, celle dans laquelle pénètre le piston d'injection (fig. III-34). Les granulés sont chauffés par conduction à partir des parois du cylindre ou « pot » et, à l'intérieur du cylindre, on est obligé de prévoir une pièce métallique centrale appelée « torpille » pour contraindre les granulés fondus à longer les parois. Les frottements des granulés solides et les pertes de charges hydrauliques entraînent une grande dépense d'énergie ; il en résulte que la pression du matériau à l'intérieur du moule est seulement les deux tiers sinon la moitié de la pression théorique appliquée sur les granulés.

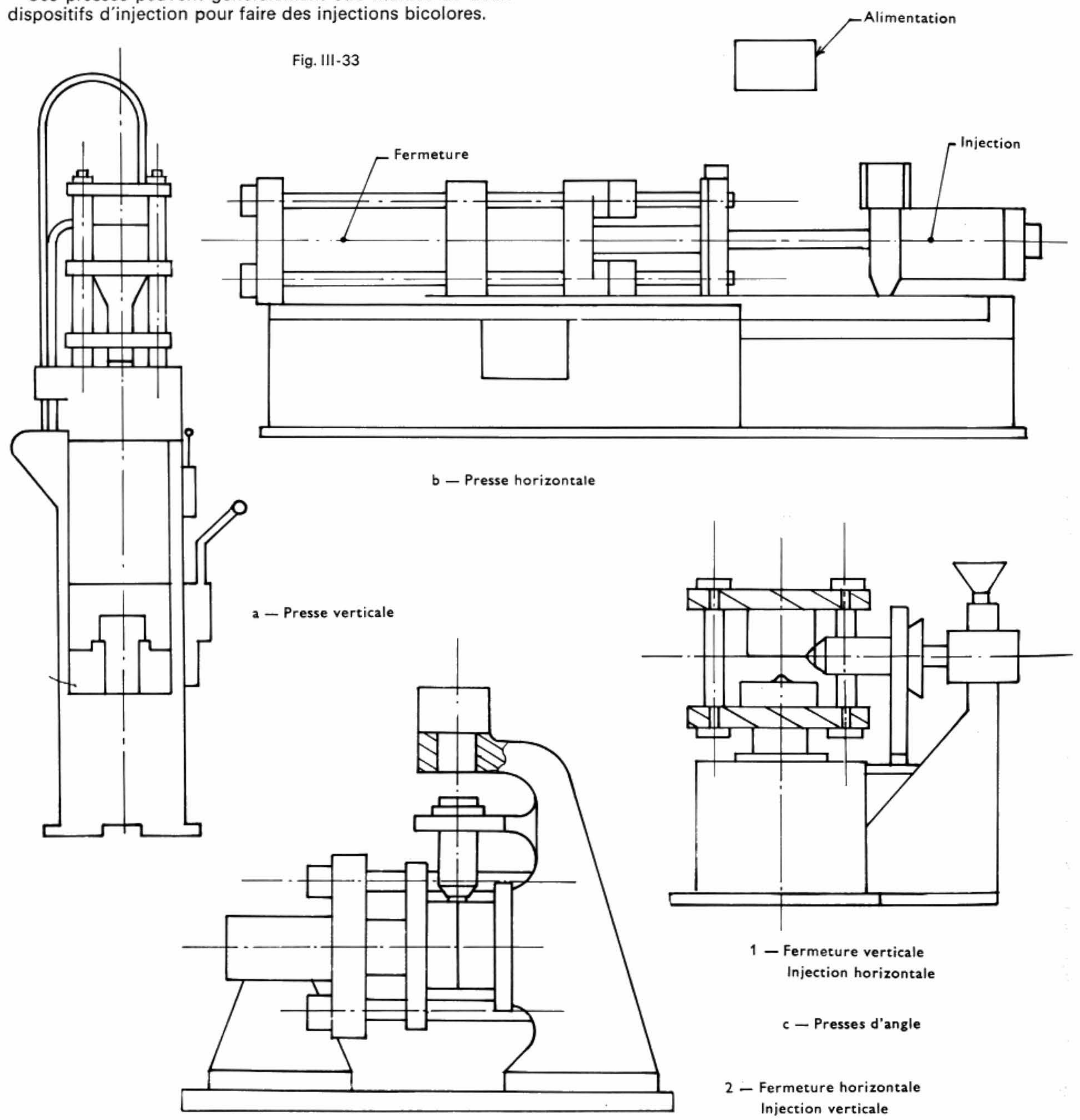


Fig. III-33

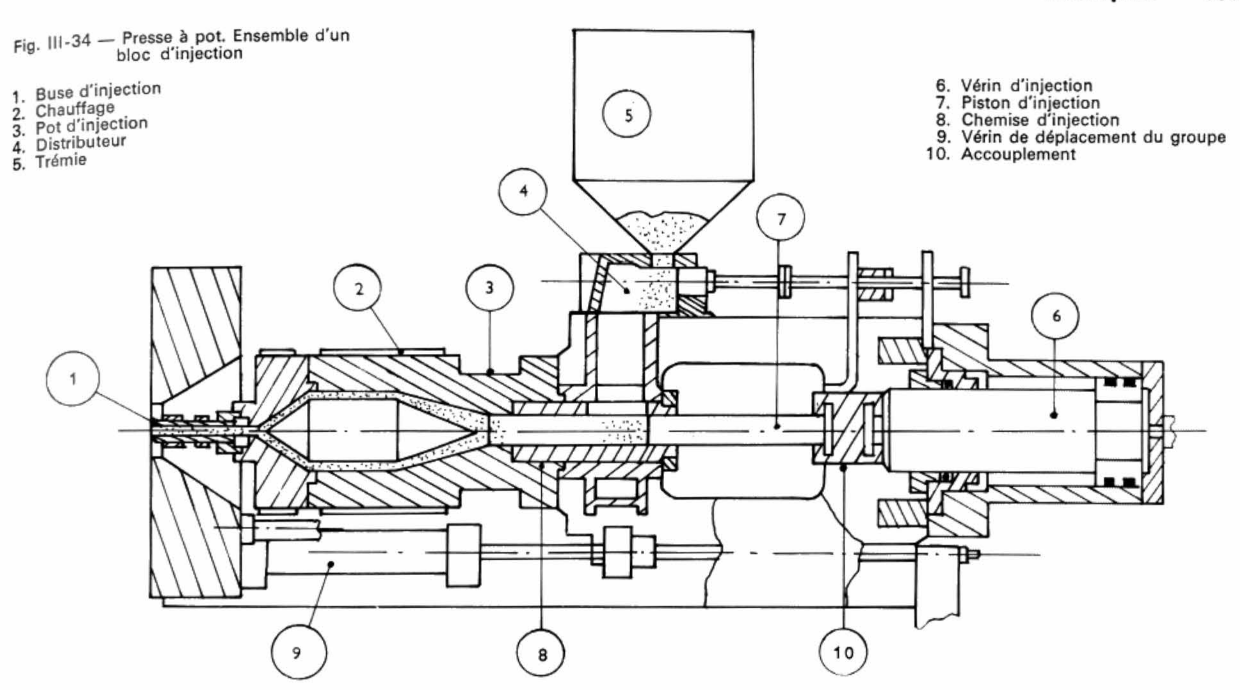


Fig. III-34 — Presse à pot. Ensemble d'un bloc d'injection

1. Buse d'injection
2. Chauffage
3. Pot d'injection
4. Distributeur
5. Trémie
6. Vérin d'injection
7. Piston d'injection
8. Chemise d'injection
9. Vérin de déplacement du groupe
10. Accouplement

Plusieurs solutions ont été étudiées avec succès pour améliorer les dispositifs de plastification-injection. Dans une première phase, les constructeurs de machines ou les producteurs de plastiques ont *modifié la torpille* pour augmenter son efficacité ou diminuer les pertes de charges qu'elle entraînait (fig. III-35).

Ensuite, un progrès notable a été fait en *séparant dispositifs de plastification et d'injection*. Dans ce cas, un cylindre contenant une torpille permet de plastifier le plastique et d'alimenter un ensemble cylindre-piston qui injecte le produit fondu à l'intérieur du moule (fig. III-36). Dans cette dernière solution, les frottements solides et pertes de charges ont été considérablement diminués pendant l'injection ; cependant, le cylindre avec torpille, qui est utilisé pour la plastification, est toujours un aussi mauvais échangeur de chaleur. Nous retrouverons le problème du chauffage des polymères dans tous les cas de mise en œuvre, car ces matériaux sont de bons isolants et ils sont généralement introduits dans les machines de transformation sous la forme discontinue de granulés.

Il résulte de ce qui précède, qu'une amélioration très sensible a été obtenue lorsqu'on a *remplacé le dispositif de plastification à torpille par un corps d'extrudeuse*, contenant une vis d'Archimède et alimentant le cylindre d'injection (fig. III-37).

On rencontre les deux dernières solutions dans de nombreuses machines industrielles et toutes les positions rela-

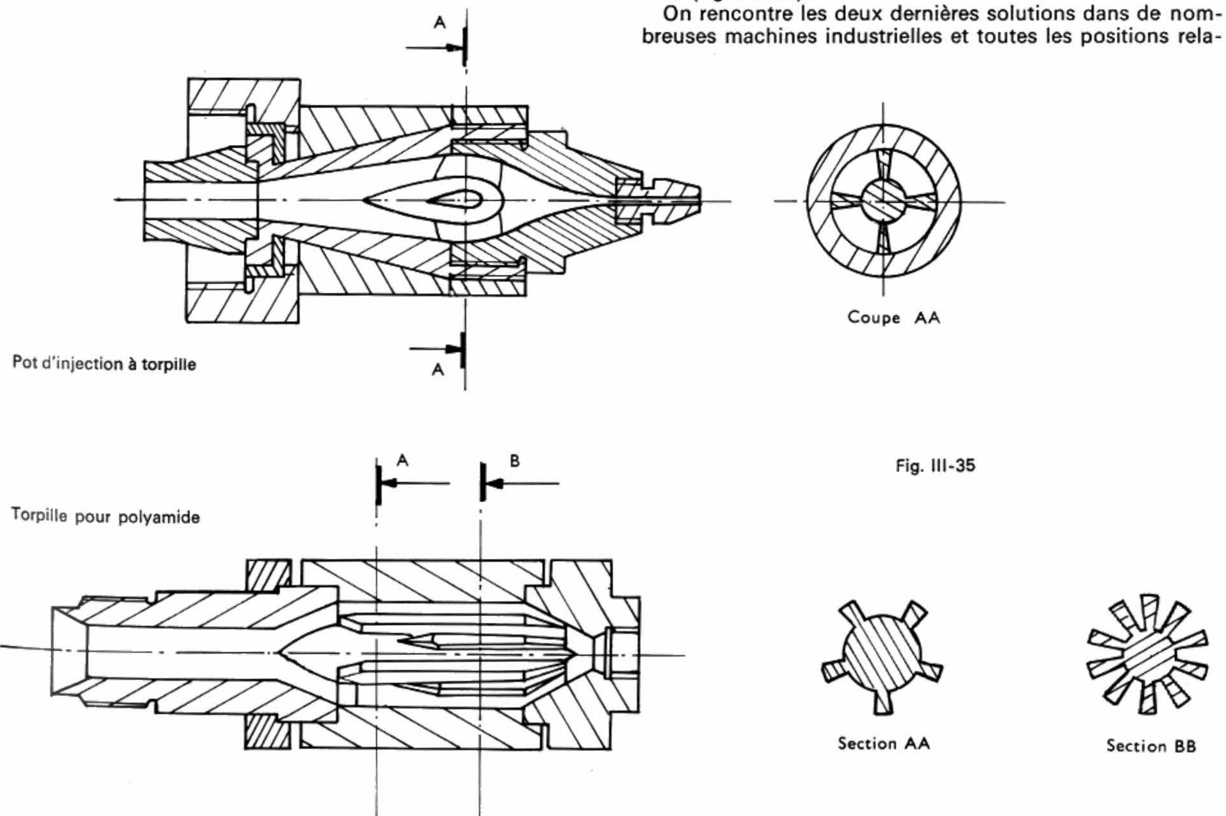


Fig. III-35

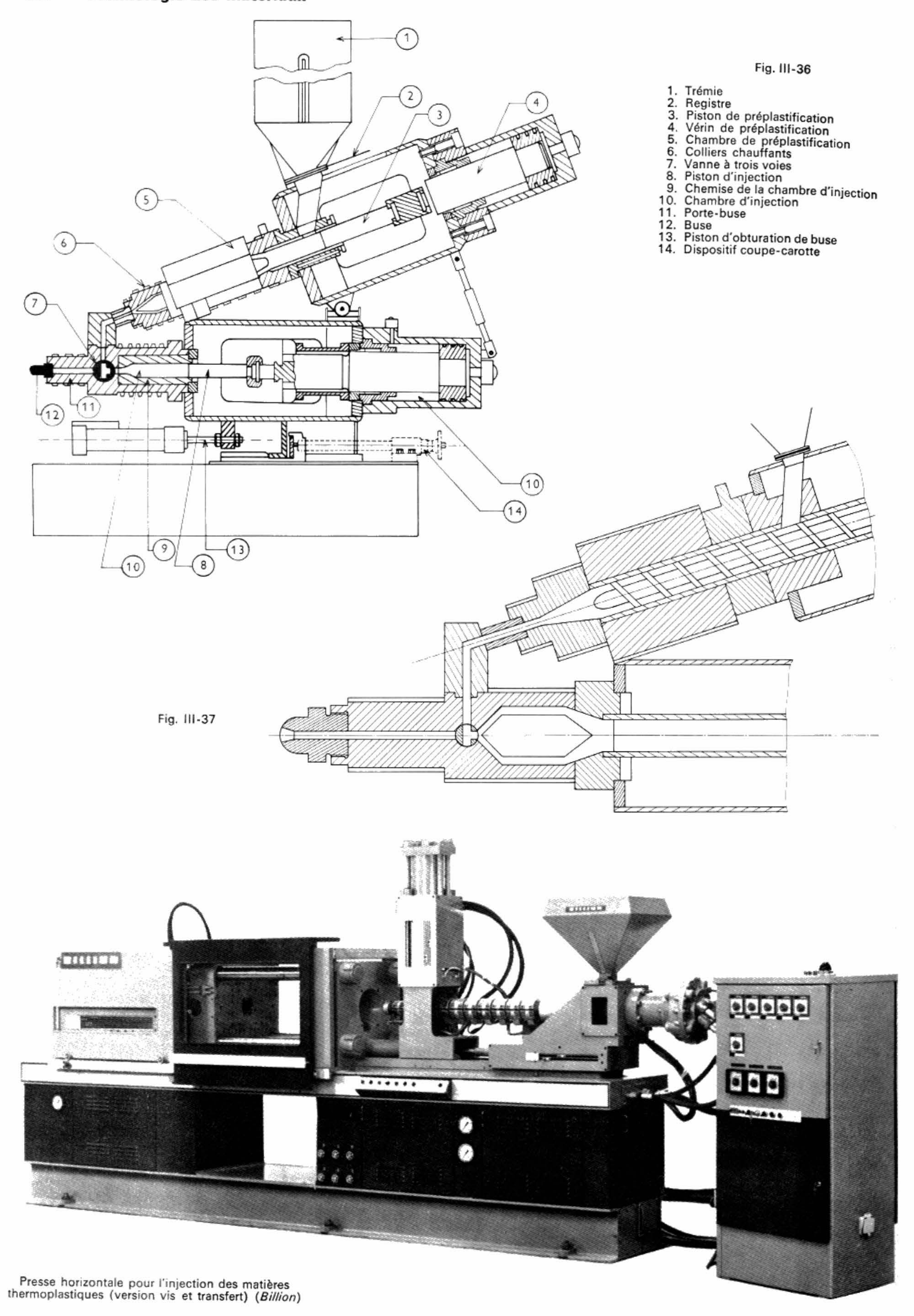


Fig. III-36

1. Trémie
2. Registre
3. Piston de préplastification
4. Vérin de préplastification
5. Chambre de préplastification
6. Colliers chauffants
7. Vanne à trois voies
8. Piston d'injection
9. Chemise de la chambre d'injection
10. Chambre d'injection
11. Porte-buse
12. Buse
13. Piston d'obturation de buse
14. Dispositif coupe-carotte

Fig. III-37

Presse horizontale pour l'injection des matières thermoplastiques (version vis et transfert) (*Billion*)

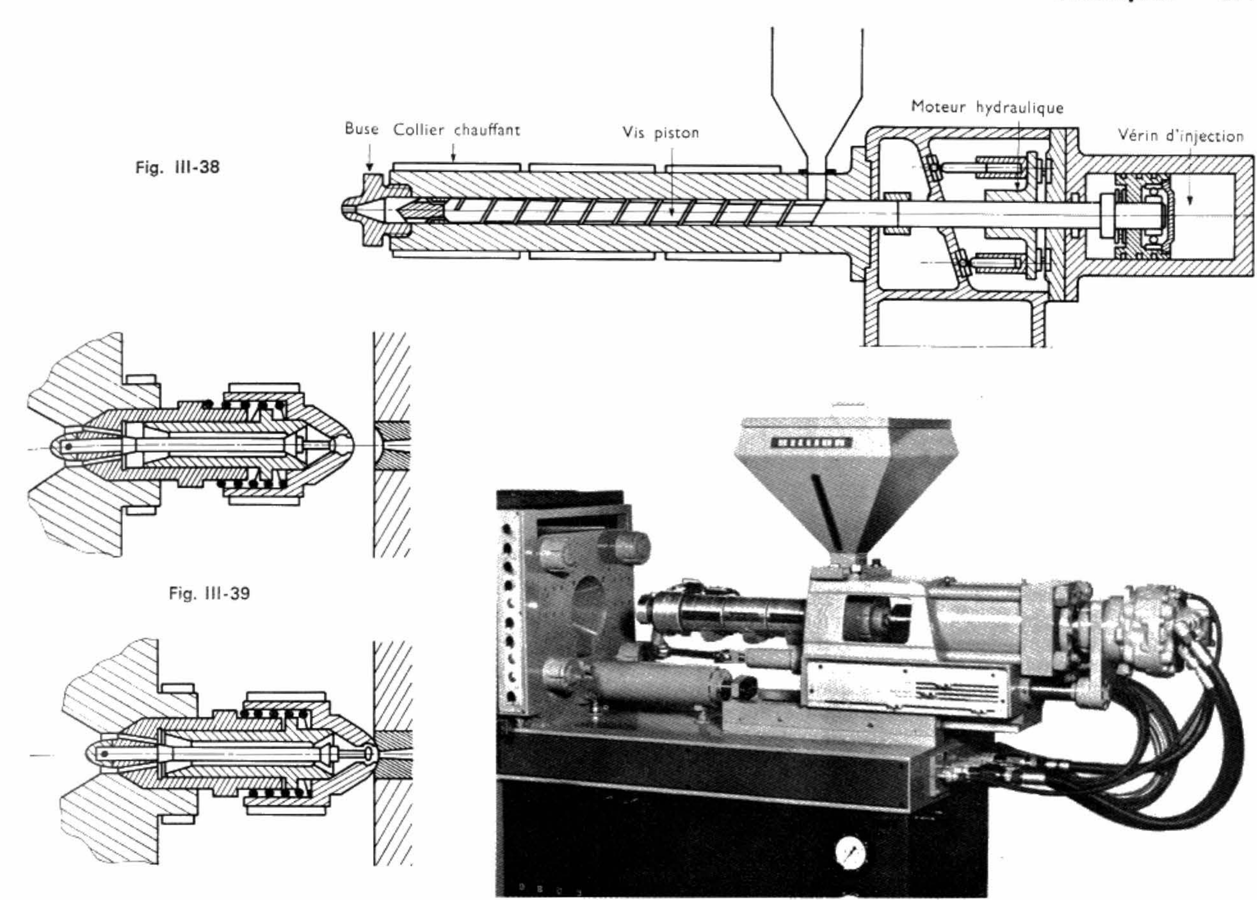


Fig. III-38

Fig. III-39

Ensemble injecteur de presse pour thermoplastiques (*Billion*)

tives des deux organes (plastification et injection) ont été envisagées. Les presses qui les utilisent sont dites « à pré-plastification ».

La dernière étape de l'évolution du dispositif d'injection date de 1958 ; elle a consisté à utiliser un corps d'extrudeuse, dans lequel la vis est mobile en rotation pour plastifier les granulés et libre de se déplacer en translation pour chasser le produit fondu et homogène à l'intérieur du moule (fig. III-38). Il faut munir la buse d'un dispositif de fermeture (fig. III-39) et la vis, d'un clapet anti-retour à son extrémité, pour empêcher la matière de refluer dans le creux de filet de la vis.

L'opération d'injection se déroule de la façon suivante :

— La vis tourne et la matière est transportée à l'avant de l'extrudeuse pendant que la vis recule, jusqu'à ce que la quantité de matière nécessaire au moulage de l'objet soit stockée à l'avant de la vis. Un réglage du recul de la vis permet de contrôler ce résultat automatiquement.

— Le dispositif d'injection est alors mis en contact avec le moule verrouillé et le vérin hydraulique qui est situé en bout de vis pousse cette dernière ; le dispositif de fermeture de la buse s'ouvre, la vis avance et injecte le produit fondu, le clapet antiretour se fermant automatiquement pendant l'injection.

b) *Dispositif de verrouillage.* — Certaines presses appelées « pousse-tout » (utilisées également pour le transfert des matières thermodurcissables) possèdent seulement un vérin qui assure en même temps la fermeture et l'injection. Ce sont des presses verticales, elles se ferment de bas en haut. La manœuvre du plateau inférieur entraîne la fermeture du moule, qui continue à monter et à soulever le pot d'injection. Le piston d'injection est fixé à la partie haute, au sommier de la presse ; il pénètre dans le cylindre d'injection et chasse le produit dans le moule. Le cycle se termine par le mouvement inverse du plateau (fig. III-40). Dans des presses de ce type, la force de fermeture est égale à la force d'injection ; il en résulte que la surface projetée de l'objet injecté doit être plus petite ou au plus égale à celle du piston d'injection. Ces presses sont actuellement peu répandues.

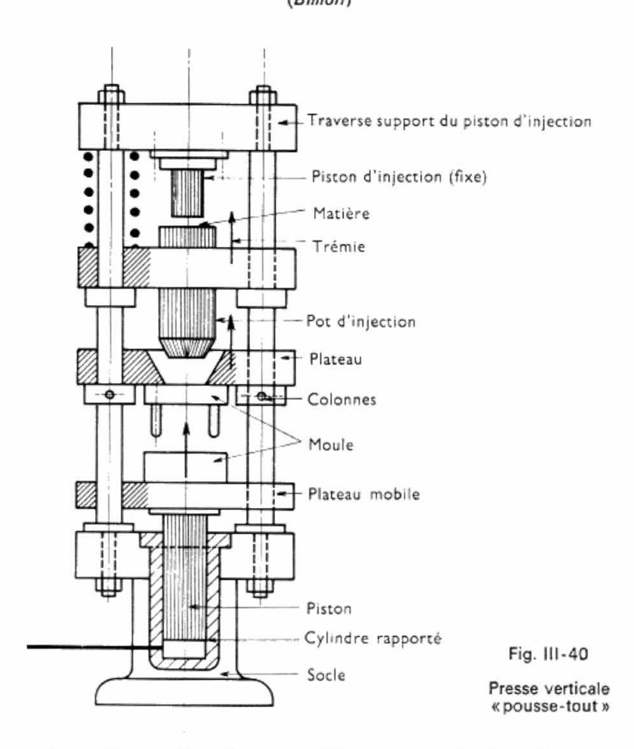
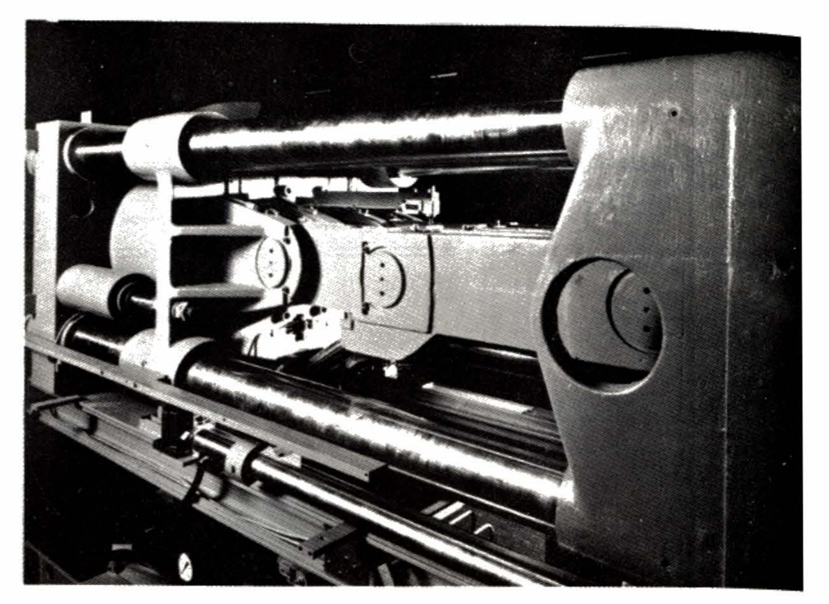


Fig. III-40
Presse verticale « pousse-tout »

Les dispositifs de verrouillage sont **hydrauliques, mécaniques** ou **mixtes.**

Les dispositifs hydrauliques ont un fonctionnement souple, n'exigeant aucun réglage de la course de verrouillage. Ils sont généralement conçus pour donner une vitesse d'approche rapide et une fermeture lente.



Système de fermeture de presse (*Billion*)

Les dispositifs mécaniques sont fréquemment constitués par un système de genouillères, le plus souvent manœuvrées par des vérins hydrauliques (fig. III-41).

Les dispositifs mixtes comportent des genouillères d'approche et un blocage par vérin hydraulique à très faible course (fig. III-42).

2° *Moule.* — Un moule d'injection est généralement réalisé en acier correctement traité. Il doit être usiné avec précision et c'est très souvent une pièce coûteuse.

Il peut être destiné à faire un seul objet ou plusieurs à la fois ; dans ce dernier cas, le moule est à empreintes multiples. La construction d'un moule correspond presque toujours à l'assemblage d'éléments normalisés ou non, qui sont dessinés pour faciliter l'usinage et la révision du moule (fig. III-43). Les figures III-43 et III-44 montrent des détails de construction que l'on retrouve dans presque tous les moules d'injection à plusieurs empreintes (1 à 8).

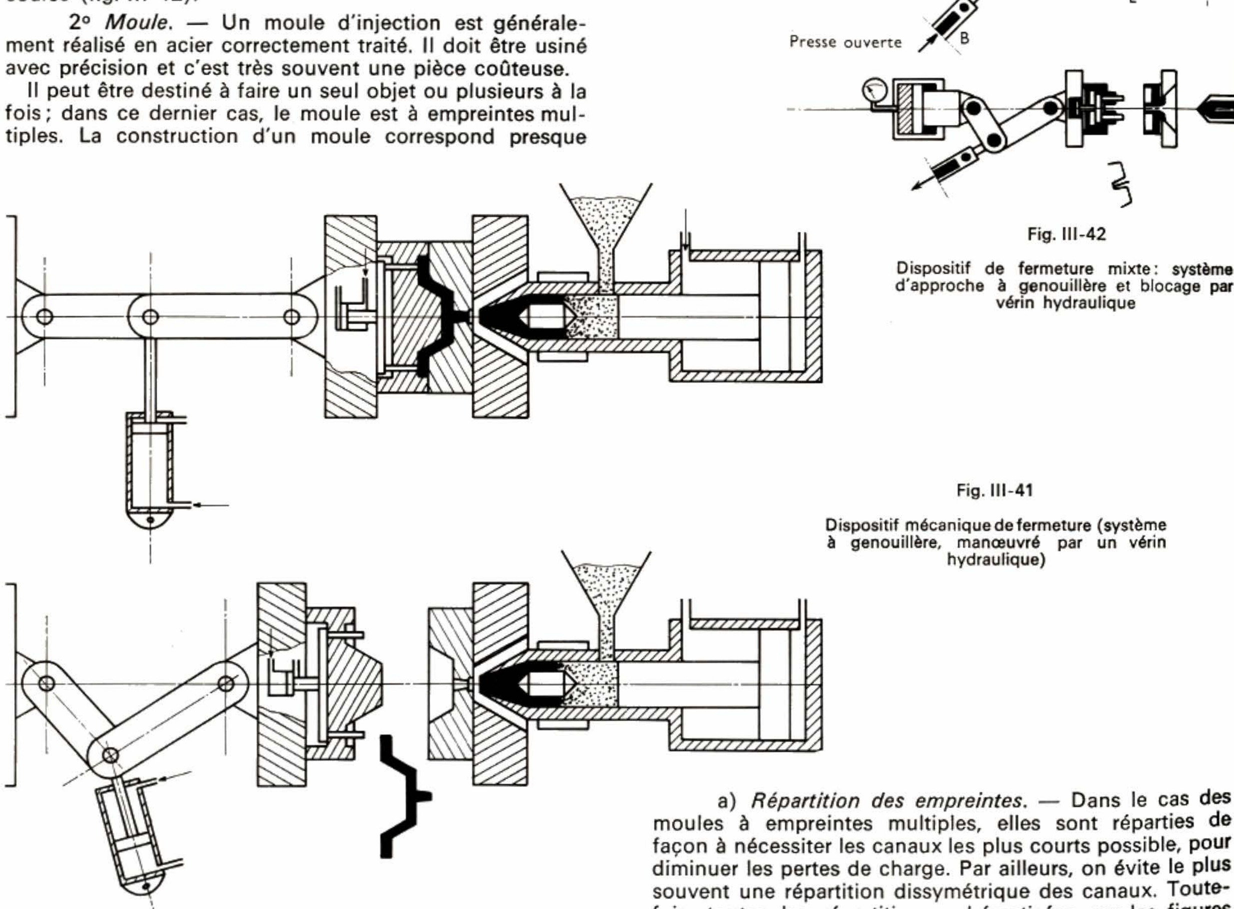


Fig. III-42

Dispositif de fermeture mixte : système d'approche à genouillère et blocage par vérin hydraulique

Fig. III-41

Dispositif mécanique de fermeture (système à genouillère, manœuvré par un vérin hydraulique)

a) *Répartition des empreintes.* — Dans le cas des moules à empreintes multiples, elles sont réparties de façon à nécessiter les canaux les plus courts possible, pour diminuer les pertes de charge. Par ailleurs, on évite le plus souvent une répartition dissymétrique des canaux. Toutefois, toutes les répartitions schématisées sur les figures III-45 a et III-45 b peuvent être employées. Les empreintes alignées conduisent normalement à des moules parallélépipédiques (fig. III-45 a). Les moules cylindriques sont souvent plus faciles à usiner (fig. III-45 b).

b) *Alimentation des empreintes.* — Les empreintes peuvent être alimentées par des entrées larges, coniques de 5 à 12 mm de diamètre de base, par des toiles, par des

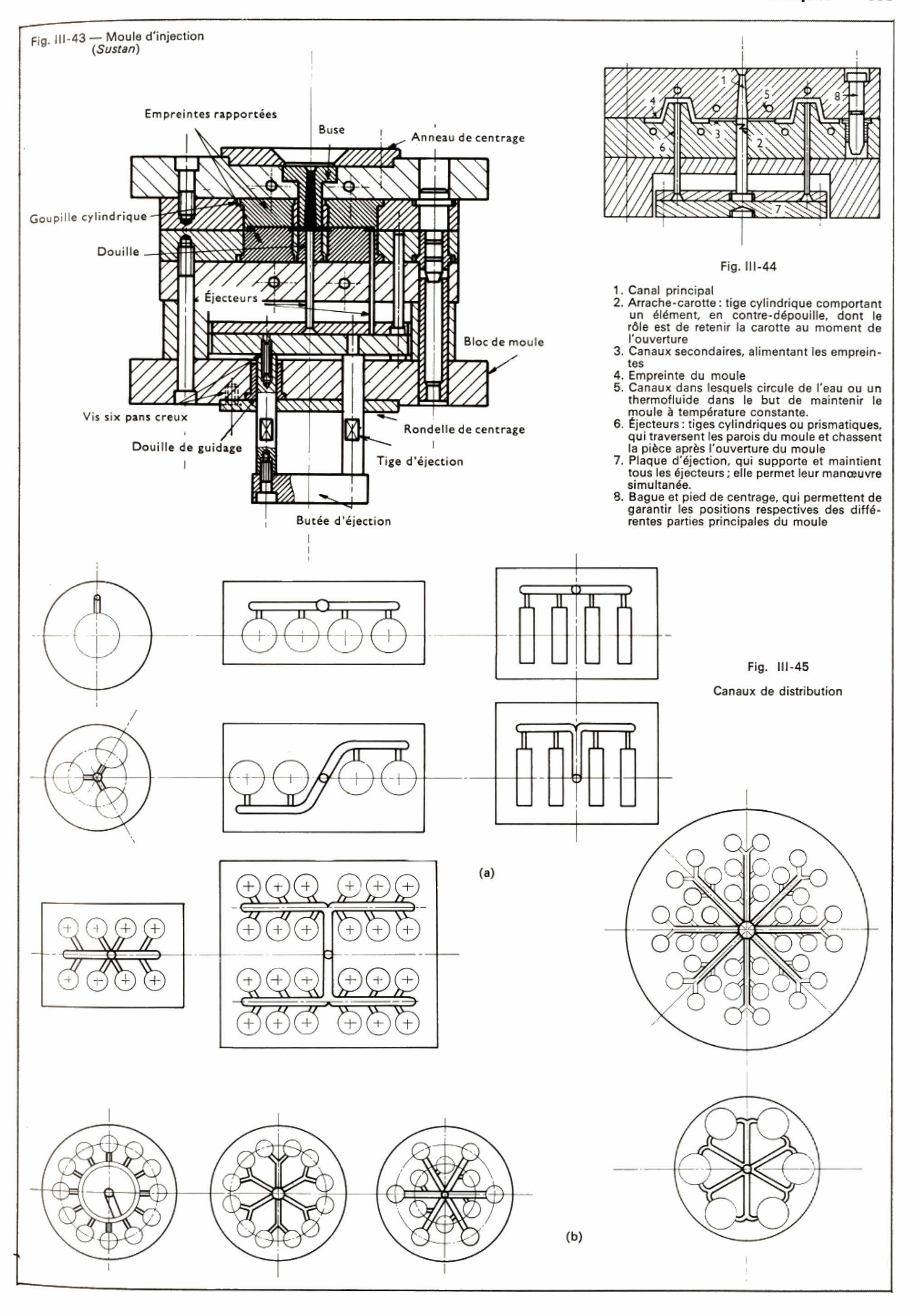


Fig. III-43 — Moule d'injection (*Sustan*)

Fig. III-44

1. Canal principal
2. Arrache-carotte : tige cylindrique comportant un élément, en contre-dépouille, dont le rôle est de retenir la carotte au moment de l'ouverture
3. Canaux secondaires, alimentant les empreintes
4. Empreinte du moule
5. Canaux dans lesquels circule de l'eau ou un thermofluide dans le but de maintenir le moule à température constante.
6. Éjecteurs : tiges cylindriques ou prismatiques, qui traversent les parois du moule et chassent la pièce après l'ouverture du moule
7. Plaque d'éjection, qui supporte et maintient tous les éjecteurs ; elle permet leur manœuvre simultanée.
8. Bague et pied de centrage, qui permettent de garantir les positions respectives des différentes parties principales du moule

Fig. III-45

Canaux de distribution

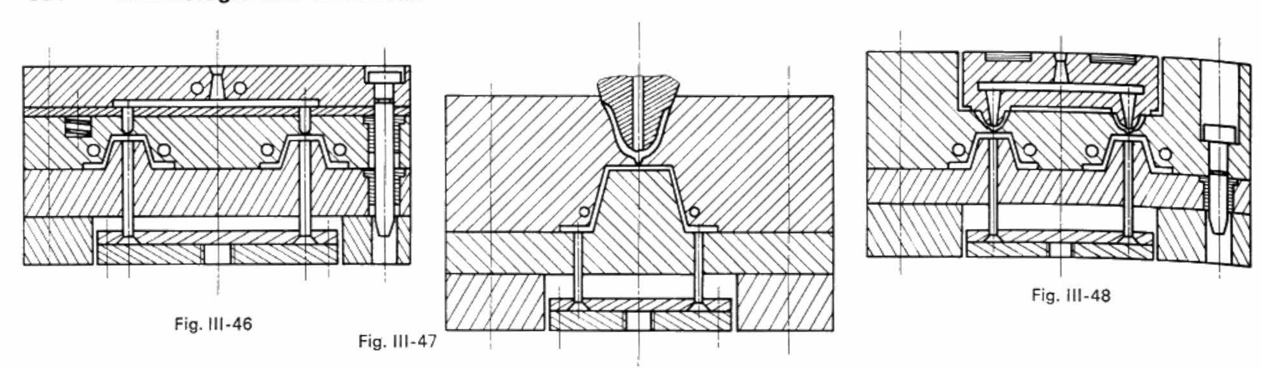


Fig. III-46

Fig. III-47

Fig. III-48

alimentations capillaires (*pin point gating*). On peut avoir une ou plusieurs attaques par pièce. Les alimentations capillaires peuvent être perpendiculaires à la pièce, dans le plan de joint du moule ou en dessous de celui-ci (alimentation sous-marine).

À titre d'exemple, nous avons représenté la pièce de la figure III-44 en montrant différentes solutions d'alimentation :

— Figure III-46 : alimentation capillaire — moule à empreintes multiples. Le moule se sépare en trois parties principales, de façon à démouler les objets entre les deux premières et à sortir les canaux d'alimentation entre la deuxième et la troisième.

— Figure III-47 : alimentation d'une seule empreinte en trou d'épingle.

— Figure III-48 : moule à empreintes multiples et à « canaux chauffants » ; le bloc supérieur contenant la carotte et les canaux de distribution, est chauffé et régulé, de sorte que la matière qu'il contient est continuellement fondue. Ce type de moule est utilisé pour l'injection des objets à parois minces (gobelets pour distributeur de boissons) ; il permet d'atteindre des épaisseurs minimales de 0,40 mm pour le polystyrène.

3° *Objets injectés et possibilités de l'injection*

a) *Dimensions.* — L'injection est utilisable pour des pièces de très petites dimensions (pièces d'horlogerie), et aussi pour des pièces plus grandes pesant jusqu'à 33 kg. Dans le premier cas, il est évident que les canaux d'alimentation sont plus lourds que les pièces elles-mêmes. On peut difficilement injecter des pièces d'épaisseur inférieure à 0,4 mm et il n'est pas recommandé, pour des raisons économiques, de prévoir de grandes épaisseurs qui entraînent des temps de refroidissement longs et des risques de retassures.

b) *Prisonniers.* — On peut placer dans le moule des objets en métal, en céramique, en bois, etc., tournés, filetés, sous forme de tissus, de cales, etc., injecter le matériau choisi et sortir une pièce qui les retient prisonniers. Ces objets introduits dans le moule sont appelés « prisonniers » ou « *inserts* » (fig. III-49).

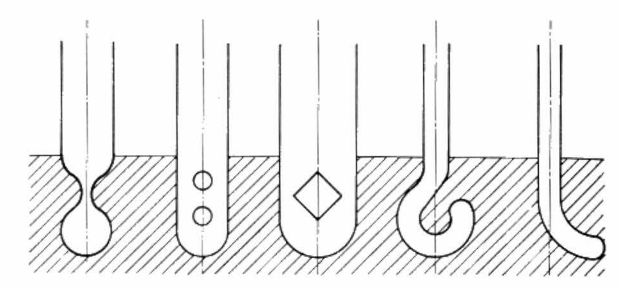
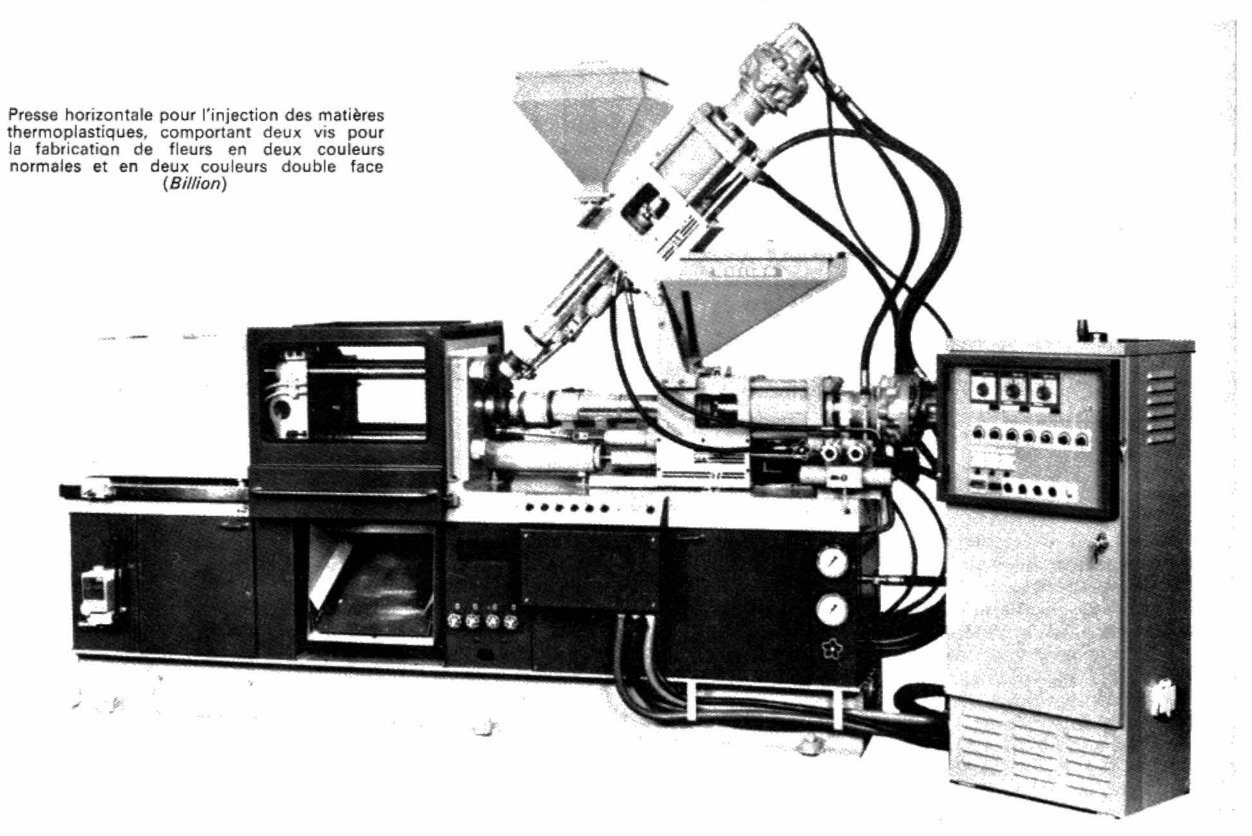


Fig. III-49 — Différentes sortes de « prisonniers »



Presse horizontale pour l'injection des matières thermoplastiques, comportant deux vis pour la fabrication de fleurs en deux couleurs normales et en deux couleurs double face (*Billion*)

c) *Surmoulage.* — L'opération précédente peut être réalisée en plaçant dans le moule une pièce incomplète en plastiques et en injectant le même matériau d'une couleur différente par exemple. Cette technique dite de « surmoulage » est couramment employée pour la réalisation de nombreuses pièces bicolores (touches de machines à écrire).

4° *Techniques dérivées de l'injection*

a) *Injection-soufflage.* — Pour la réalisation de corps creux, on injecte une ébauche qui est transférée dans un deuxième moule, dans lequel l'ébauche est soufflée (fig. III-50). Cette technique présente un avantage sur l'extrusion-soufflage ; elle n'entraîne pas la formation d'une soudure qui serait peu solide avec certains matériaux (polystyrène). Par ailleurs, elle permet de définir une partie de la pièce avec la même précision que celle que l'on peut espérer dans un moulage par injection.

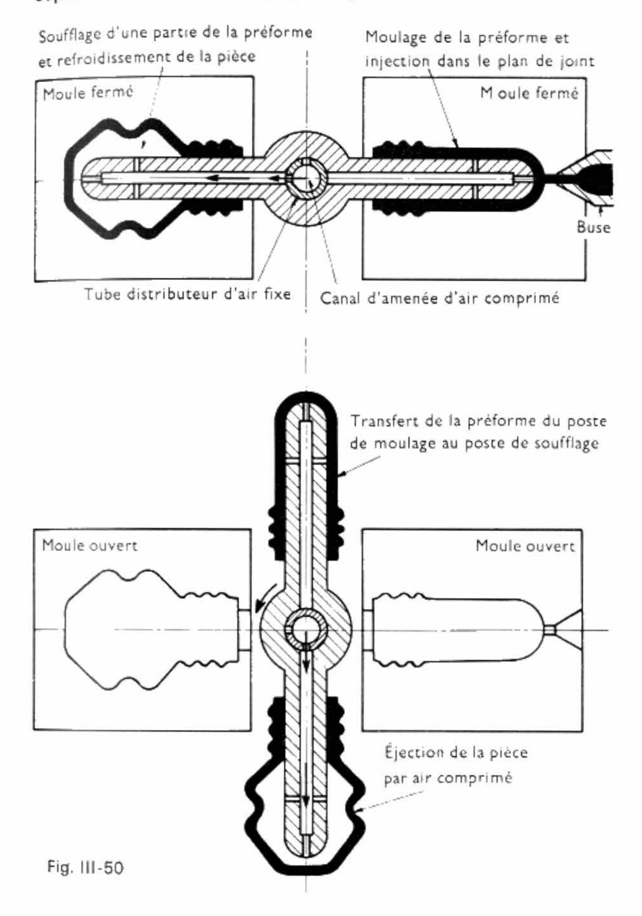


Fig. III-50

b) *Intrusion.* — Nous avons vu plus haut qu'une extrudeuse pouvait alimenter un dispositif d'injection, il pourrait être tentant de l'utiliser directement pour remplir un moule. On peut effectivement le faire avec du PCV plastifié ; les autres matériaux nécessitent un chauffage du moule, dont la température doit être voisine de celle du produit injecté. De plus il faut utiliser des pistons traversant les parois du moule et agissant sur des masselottes, destinées à maintenir le produit fondu sous pression pendant le refroidissement et à compenser le retrait thermique. Cette méthode est intéressante pour les petites séries et les pièces très massives (jusqu'à 200 mm d'épaisseur).

2.3. Extrusion. — L'extrusion est une technique de mise en œuvre des matières thermoplastiques, conduisant à la fabrication en continu de profilés souples ou rigides et de films ou permettant le gainage de profilés ou de câbles. Elle fait appel à une **extrudeuse** encore appelée « boudineuse ». Le même matériel associé à un outillage spécialisé sert à la production de corps creux par **extrusion-gonflage.**

2.3.1. Principe. — L'extrusion consiste à utiliser une machine constituée essentiellement d'une ou de plusieurs vis d'Archimède, tournant à l'intérieur d'un cylindre chauffé. Une matière thermoplastique en granulés, en poudre ou en déchets, est introduite à l'entrée de la machine ; le produit est malaxé, chauffé et comprimé par la vis et véhiculé jusqu'à l'extrémité où se trouve la filière. Le produit fondu et homogène passe à travers la filière, qui donne sa forme au profilé sortant ; ce dernier est ensuite calibré, refroidi et entraîné par des dispositifs extérieurs.

2.3.2. Matières extrudées. — Toutes les matières thermoplastiques peuvent être extrudées plus ou moins facilement, certaines comme le polytétrafluoréthylène exigent des conditions opératoires et un matériel adapté, (les extrudeuses à piston sont le plus souvent employées dans ce cas). Pour les autres matériaux, le dessin des vis, les vitesses de rotation et les températures de régulation dépendent du polymère extrudé. L'extrusion des matières thermodurcissables a été envisagée mais elle est actuellement peu répandue. Les principales matières thermoplastiques extrudées sont le PCV rigide, le PCV plastifié, le polyéthylène basse densité, le polyéthylène haute densité, le PMMA, le PS et ses dérivés, le polypropylène, les cellulosiques, les polyamides ; le PCV peut être utilisé en poudre ou comme les autres produits extrudés, en granulés. Ces granulés peuvent être colorés dans la masse ; on peut aussi utiliser des granulés incolores ou blancs et ajouter avant l'extrusion, soit le colorant en poudre, soit des granulés à forte concentration de colorant (mélange-maître).

2.3.3. Matériel utilisé dans l'extrusion

1° *Extrudeuses. Généralités.* — Les extrudeuses diffèrent par la conception des dispositifs utilisés pour assurer le mélangeage et le transfert du produit extrudé ou par leur disposition.

Différents dispositifs. — Il existe des extrudeuses monovis et des extrudeuses à deux ou à trois vis. De plus, un certain nombre d'autres solutions ont été envisagées : elles ont conduit à des extrudeuses à engrenages et à des extrudeuses dites à effet Weissenberg, par exemple.

Disposition des éléments de l'extrudeuse. — Les extrudeuses à vis sont pour la plupart horizontales mais il existe des extrudeuses verticales et des extrudeuses à étages.

a) *Extrudeuses monovis.* — La plupart des boudineuses monovis comportent des éléments chauffants électriques ou une circulation d'huile qui jouent un rôle essentiel dans la plastification thermique des granulés ; dans certaines extrudeuses à fonctionnement adiabatique ou autothermique, la chaleur nécessaire à la gélification est uniquement fournie par friction. Ces dernières sont beaucoup plus rares. Une extrudeuse monovis est caractérisée par le diamètre D de la vis et par sa longueur exprimée en nombre de diamètres. Les extrudeuses actuelles ont des diamètres de vis compris entre 30 et 250 mm et les longueurs sont comprises entre 15 et 35 D. Les progrès récents apparus dans le domaine des extrudeuses monovis concernent la longueur de la vis, son dessin, et la vitesse de rotation qui a été augmentée. Nous examinerons plus loin, en détail, les extrudeuses monovis qui sont les plus répandues.

b) *Extrudeuses à deux vis.* — Contrairement aux extrudeuses monovis, elles peuvent travailler toutes les matières avec un seul type de vis. Dans toutes les extrudeuses, le fonctionnement normal de la machine entraîne de grands efforts axiaux sur la vis. Ces efforts sont supportés par des butées à rouleaux de grande dimension, qu'il est difficile de mettre en place dans des extrudeuses à plusieurs vis. Le problème a été résolu de façon satisfaisante, en utilisant des butées à étages, ou décalées, compatibles avec le faible entraxe. Les vis tournent soit dans le même sens soit en sens inverse, suivant la marque de l'extrudeuse. Ces machines sont généralement plus fragiles mais leur pouvoir de plastification est plus grand que celui des monovis.

c) *Extrudeuses à trois ou quatre vis.* — Des extrudeuses à trois ou quatre vis ont été construites et commercialisées, mais elles sont actuellement très peu répandues.

d) *Extrudeuses à engrenages.* — Ces extrudeuses sont plutôt conçues pour servir de mélangeur que pour fabriquer des profilés. Elles sont formées de plusieurs trains d'engrenages hélicoïdaux placés verticalement dans un corps étanche chauffé par circulation d'huile. La machine est alimentée à la partie supérieure ; la matière est entraînée par le premier train d'engrenages et prise en charge successivement par les autres jusqu'au filtre situé à la partie inférieure du corps. Le taux de compression dépend du rapport du pas des pignons, pas qui décroît entre l'entrée et la sortie (fig. III-51).

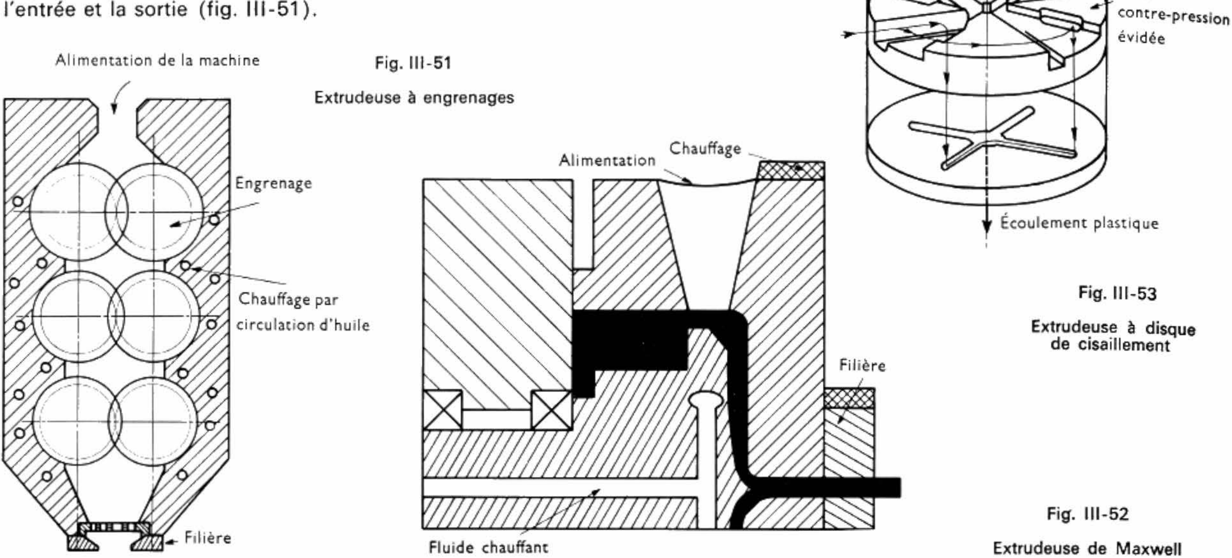


Fig. III-51
Extrudeuse à engrenages

Fig. III-52
Extrudeuse de Maxwell

Fig. III-53
Extrudeuse à disque de cisaillement

e) *Extrudeuse à effet Weissenberg.* — Lorsqu'on établit un gradient de vitesse dans un fluide newtonien, on ne crée que des contraintes tangentielles. Dans certains fluides, et en particulier dans les composés macromoléculaires en solution ou fondus, on constate en plus l'existence de contraintes normales : c'est ce que l'on appelle « effet Weissenberg ». Si le fluide est cisaillé entre deux disques, dont l'un est percé d'une ouverture centrale, le dispositif fonctionne en pompe centripète. Des extrudeuses ont été conçues sur ce principe, elles sont actuellement peu répandues (fig. III-52 et III-53).

D'autres solutions ont été essayées : cylindre rainuré tournant, vis spéciale, etc. La plupart ont été abandonnées.

f) *Extrudeuses verticales.* — Dans la plupart des extrudeuses décrites ci-dessus, la vis et son fourreau sont disposés horizontalement. Lorsque ces machines sont utilisées pour fabriquer un film par extrusion-soufflage, on préfère généralement entraîner la gaine verticalement et la filière doit donc être réunie à l'extrudeuse par une tête d'équerre avec tous les inconvénients qui résultent d'un changement de direction dans l'écoulement des polymères fondus. Certains constructeurs ont réalisé des extrudeuses verticales qui occupent moins de place au sol et sont dans l'axe de la gaine.

g) *Extrudeuses à étages.* — Dans le but d'augmenter la longueur de plastification, certains constructeurs ont mis au point des extrudeuses monovis dites en « L » qui se composent d'un corps d'extrudeuse vertical alimenté à la partie haute par une trémie et qui débouche dans un second corps placé perpendiculairement en dessous (fig. III-54). Une extrudeuse à double vis, dont les deux étages sont parallèles et superposés a également été mise au point (fig. III-55).

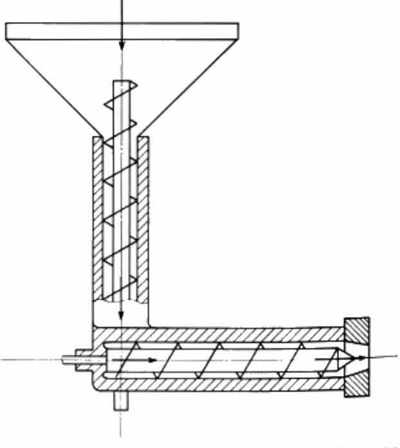
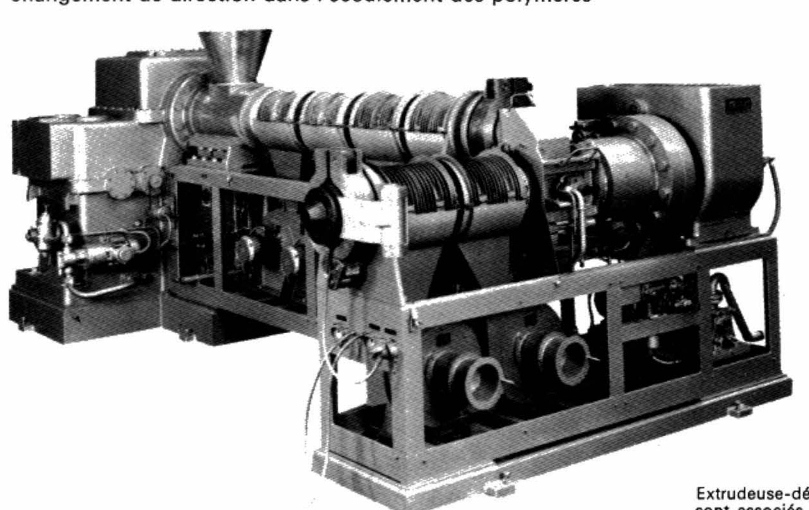


Fig. III-54 — Extrudeuse à étages (à vis en L)



Extrudeuse-dégazeuse : deux corps d'extrudeuse sont associés en L (*Pierre Potaux — Andouart*)

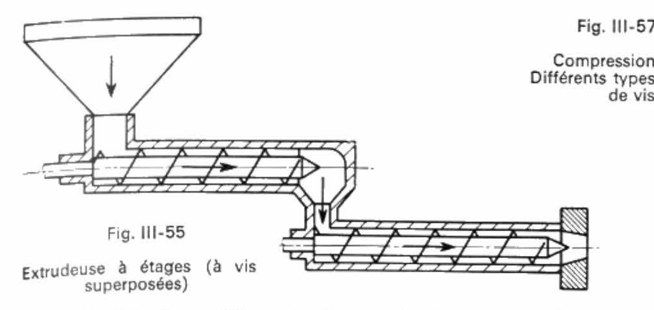


Fig. III-55

Extrudeuse à étages (à vis superposées)

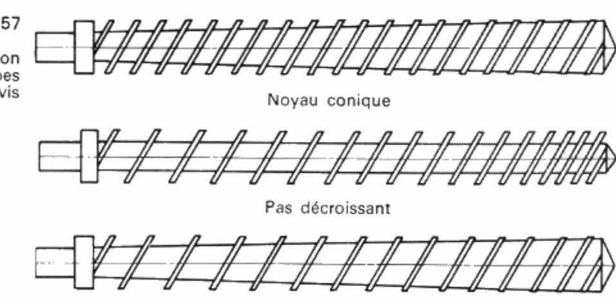


Fig. III-57

Compression
Différents types de vis

2° *Principaux éléments d'une extrudeuse monovis.* — Une extrudeuse monovis moderne peut être schématisée par la figure III-56. Elle comporte :

— un bâti qui supporte un corps entouré d'éléments chauffants et pour lequel on a prévu plusieurs points de régulation thermique ;

— une vis qui s'appuie sur une butée et qui est entraînée par un moteur électrique suivi d'un réducteur ;

— un dispositif d'alimentation comprenant une trémie qui débouche par l'intermédiaire d'une goulotte à l'entrée du corps ;

— une tête et une filière (non représentées sur le schéma) qui peuvent être fixées à la sortie du corps.

D'autres éléments sont en général prévus : dispositif de refroidissement de la vis qui est creuse, dégazage au milieu du corps, etc. Sans entrer dans les détails, nous allons donner quelques précisions sur la conception des vis, des têtes et des filières.

a) *Les vis doivent remplir plusieurs fonctions :*

— absorber la matière sortant de la trémie ;

— la transporter ;

— la gélifier ;

— la faire passer à travers la filière.

Le dessin de la vis est prévu pour assurer ces fonctions dans de bonnes conditions, compte tenu de la nature du matériau extrudé. La fonction la plus importante est probablement la gélification qui résulte de l'action de la compression fournie par la vis, de l'accroissement de la température et des pertes de charge introduites en aval par les filtres placés à l'extrémité du corps.

La compression est obtenue en faisant décroître, de façon continue ou discontinue, entre l'entrée et la sortie de l'extrudeuse, l'espace disponible par unité de longueur à l'intérieur du corps.

Trois solutions principales sont utilisées (fig. III-57) :

— la vis peut avoir un pas constant et un noyau conique ;

— le pas peut être décroissant et le noyau cylindrique ;

— le pas peut être décroissant et le noyau conique.

Le dessin de la vis doit en particulier tenir compte du facteur de contraction du matériau extrudé, c'est-à-dire du rapport entre la masse volumique du profilé et la masse volumique apparente des granulés.

Dégazage. — La présence de traces d'humidité ou la formation de gaz conduit à des profilés présentant des défauts. Différents types de vis ont été réalisés pour permettre un dégazage, grâce à un trou radial percé dans la vis dans une zone de décompression (fig. III-58). Plusieurs types d'extrudeuses utilisent une ouverture ménagée dans le cylindre et permettant éventuellement de faire le vide pour améliorer le dégazage (fig. III-59).

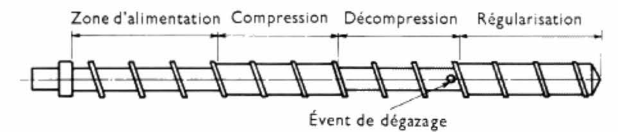


Fig. III-58 — Vis à dégazage de Bernhardt

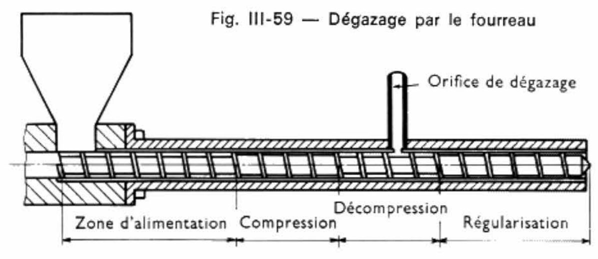


Fig. III-59 — Dégazage par le fourreau

Usinage des vis. — L'usinage des vis se fait le plus souvent par copiage, soit au tour, soit à l'aide d'une fraiseuse. Les

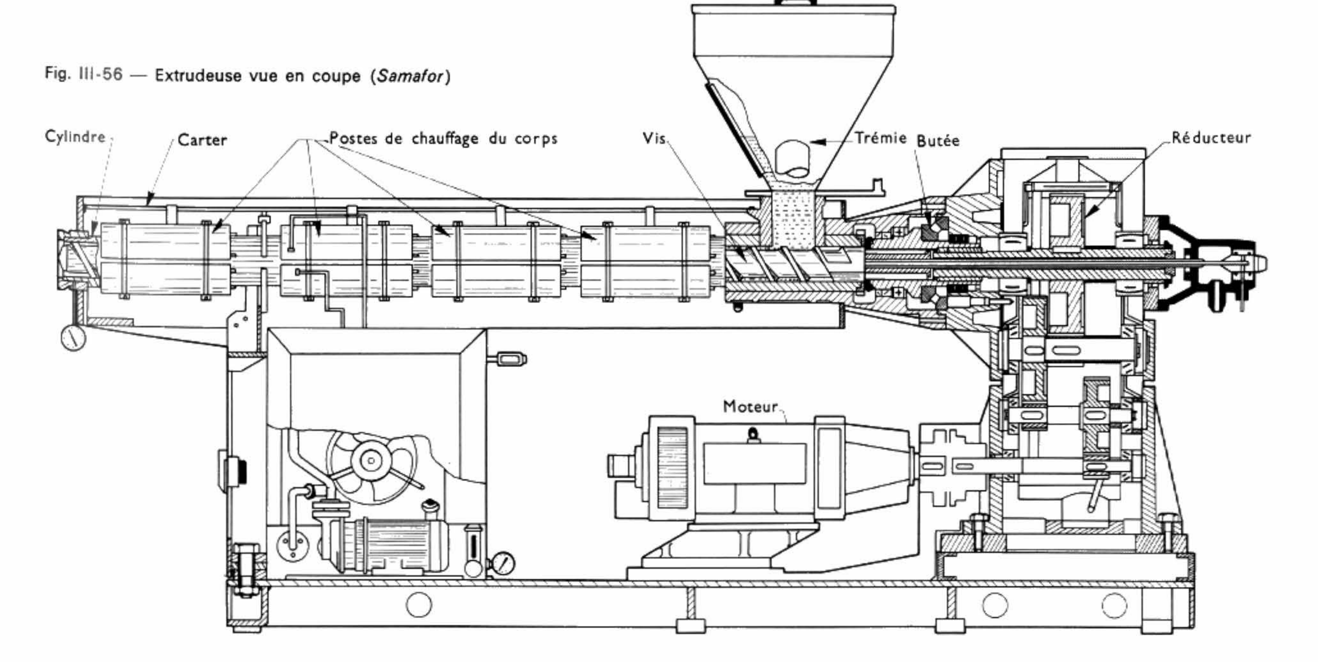


Fig. III-56 — Extrudeuse vue en coupe (*Samafor*)

vis à pas variable sont plus difficiles à réaliser et certains constructeurs ont remplacé de façon satisfaisante la décroissance continue du pas, par une variation discontinue. Pour les vis de gros diamètre, certains constructeurs rechargent les filets à l'aide d'un alliage dur de frottement. Les vis subissent généralement un traitement superficiel, tel que nitruration ou cémentation. Elles sont ensuite polies soigneusement et souvent chromées.

b) *Têtes d'extrusion.* — La tête d'extrusion est l'ensemble mécanique fixé à l'extrémité de la boudineuse à l'aide d'un écrou, d'un système à baïonnette, d'un collier de serrage ou d'une bride boulonnée. La tête d'extrusion comporte une grille de contre-pression, qui sert d'appui à des tamis, un porte-filière et une filière. Les têtes d'extrusion pour tube comprennent de plus un porte-poinçon et un poinçon (fig. III-60). La tête et la filière sont munies de colliers de chauffage et de prises de température indépendants. Les têtes d'extrusion sont réalisées en acier traité, si possible inoxydable, sinon les surfaces en contact avec le matériau extrudé doivent être chromées « dur ».

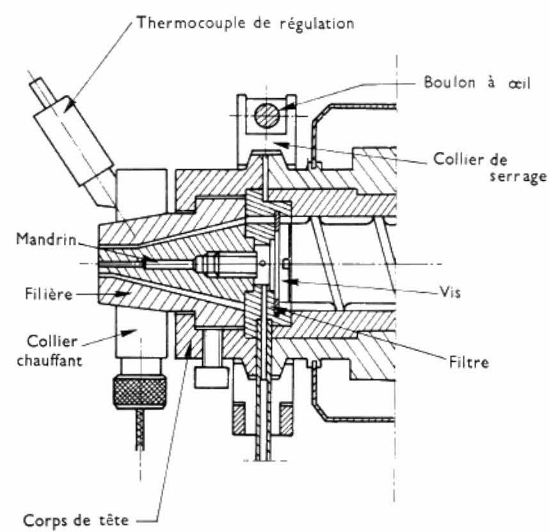


Fig. III-60

Différentes têtes. — Les têtes diffèrent considérablement par leurs formes, leurs dimensions, leur conception, qui dépendent de l'extrudeuse et du profilé extrudé. On distingue généralement deux familles principales de têtes: les têtes droites et les têtes d'angle.

— Les *têtes droites* (fig. III-60), dont l'axe est confondu avec celui de la vis sont employées pour la fabrication de profilés pleins ou tubulaires.

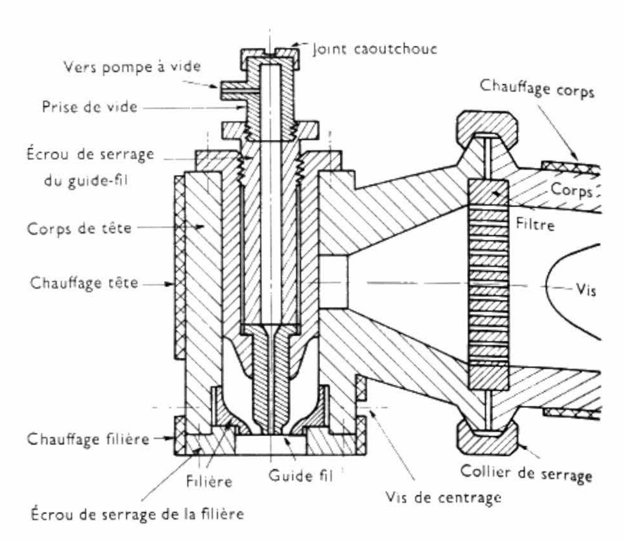


Fig. III-61 — Schéma d'une tête d'équerre

— Les *têtes d'angle* avec lesquelles le profilé ne sort pas dans l'axe de la vis (les angles choisis sont 120°, 135° et 90° pour la tête d'équerre très souvent utilisée), sont employées pour le gainage de câbles électriques et, d'une façon générale, pour le recouvrement de profilés divers (fig. III-61).

Les têtes d'équerre sont généralement utilisées pour la fabrication de films et de gaines minces par **extrusion-soufflage** (fig. III-62). De cette façon on fabrique des gaines en polyéthylène qui peuvent avoir jusqu'à cinq mètres de diamètre, ce qui conduit, après ouverture suivant une génératrice, à des bandes de quinze mètres de large.

L'extrusion-soufflage en moule, qui permet de fabriquer des corps creux par gonflage d'un tube à l'intérieur d'un moule, se fait aussi avec une tête d'équerre (fig. III-63 et III-64 a et b).



Article soufflé en polyéthylène haute densité (*Rhône-Poulenc S.A.*)

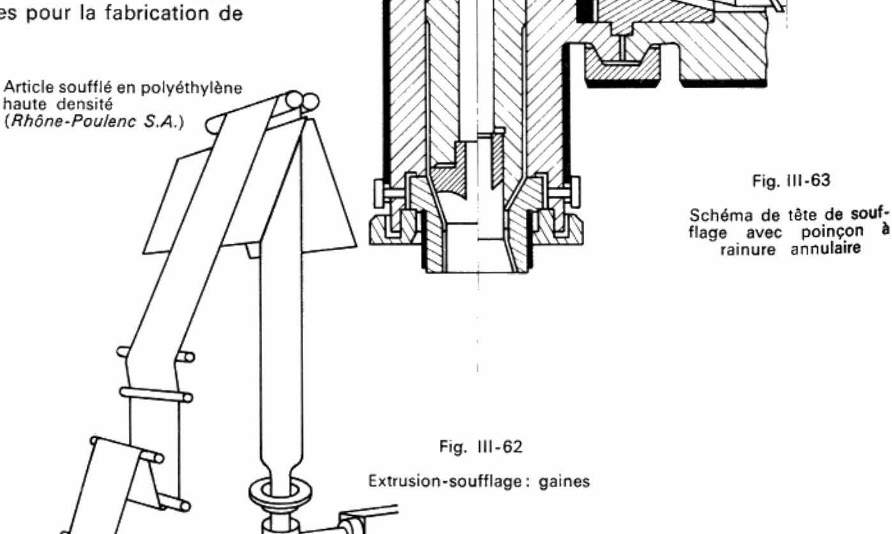
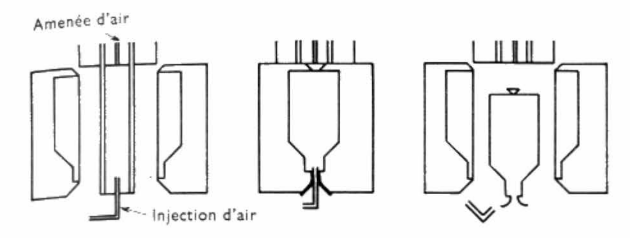


Fig. III-63

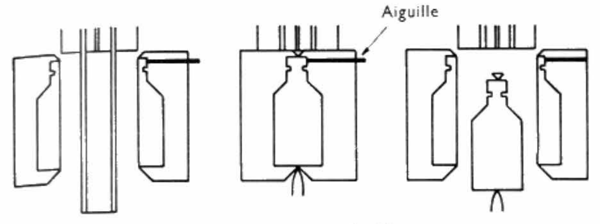
Schéma de tête de soufflage avec poinçon à rainure annulaire

Fig. III-62

Extrusion-soufflage : gaines



a) Soufflage par amenée d'air à la partie inférieure ou à la partie supérieure



b) Soufflage par aiguille

Fig. III-64

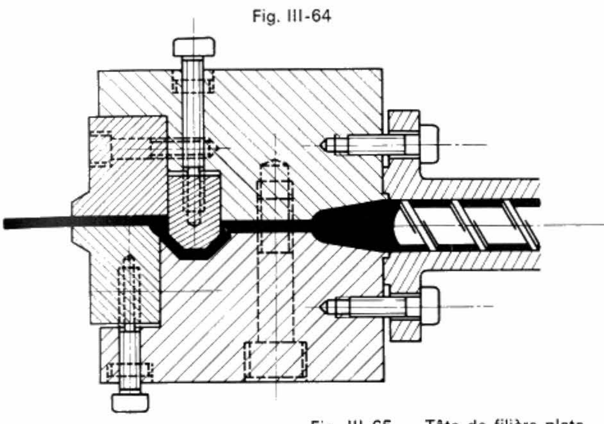


Fig. III-65 — Tête de filière plate pour extrusion de plaques

Les films et les plaques peuvent être fabriqués également en utilisant une tête de filière plate (fig. III-65).

La co-extrusion. — Depuis 1965, on a mis au point, aux États-Unis d'Amérique et en Europe, une méthode d'extrusion simultanée ou « co-extrusion » de plusieurs films plats ou gaines cylindriques en matières thermoplastiques différentes ou identiques. La méthode de co-extrusion, consiste à alimenter une filière circulaire, avec deux ou trois extrudeuses (fig. III-66 et III-67). La conception de la tête d'extrusion est évidemment le problème le plus important. Différentes solutions schématisées sur la figure III-68 ont été envisagées.

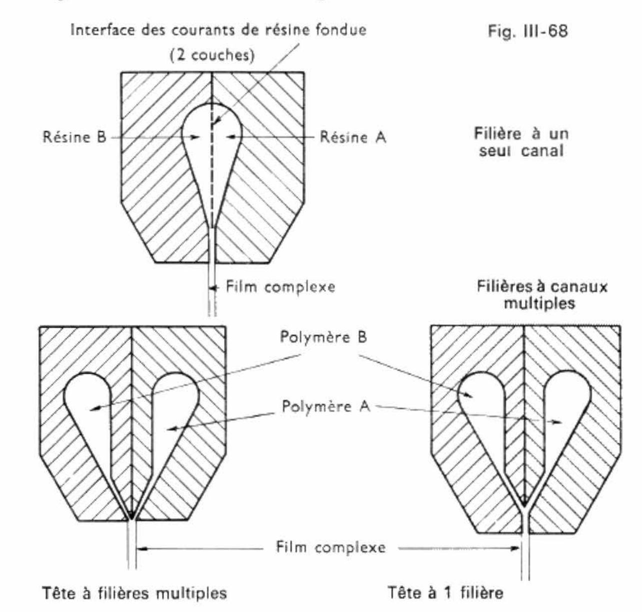


Fig. III-68

L'adhérence recherchée entre les films co-extrudés dépend :

— de la compatibilité physicochimique des polymères ;
— des caractéristiques rhéologiques des matières plastiques fondues au moment où elles entrent en contact ;
— des caractéristiques physiques des plastiques associés.

3° *Accessoires.* — À la sortie de l'extrudeuse, le profilé est pris en charge par un matériel complexe, dont la conception dépend du profilé fabriqué.

Ces dispositifs auxiliaires comprennent par exemple pour la fabrication des tuyaux (fig. III-69) :

— *un dispositif de calibrage,* qui peut être une filière ou un mandrin refroidi (fig. III-70 a et b) ;

Extrudeuse — Calibrage — Refroidissement — Convoyeur à chenille

Fig. III-69

Fabrication des tuyaux

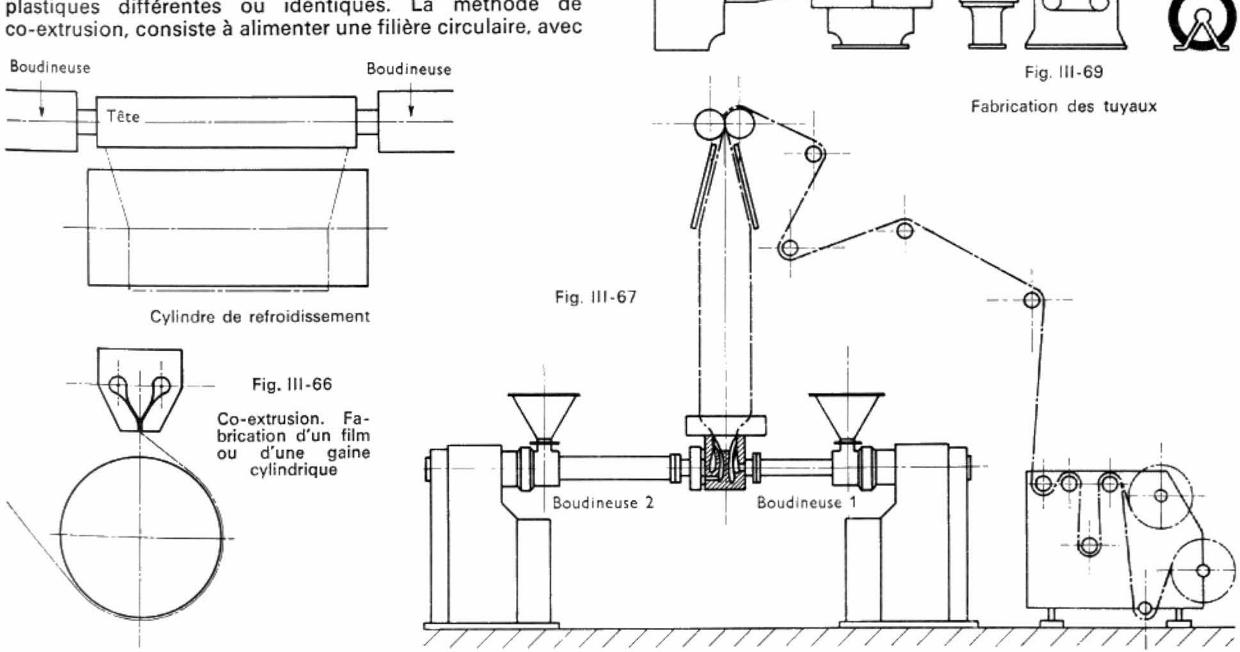
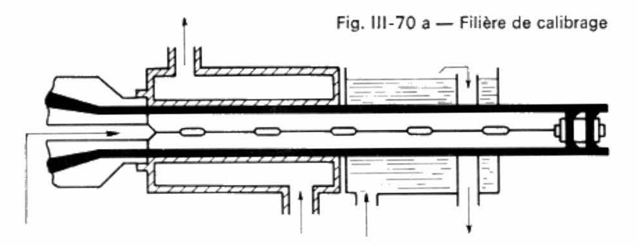
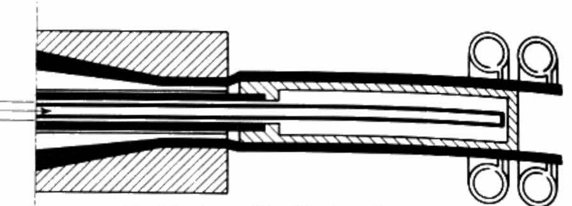


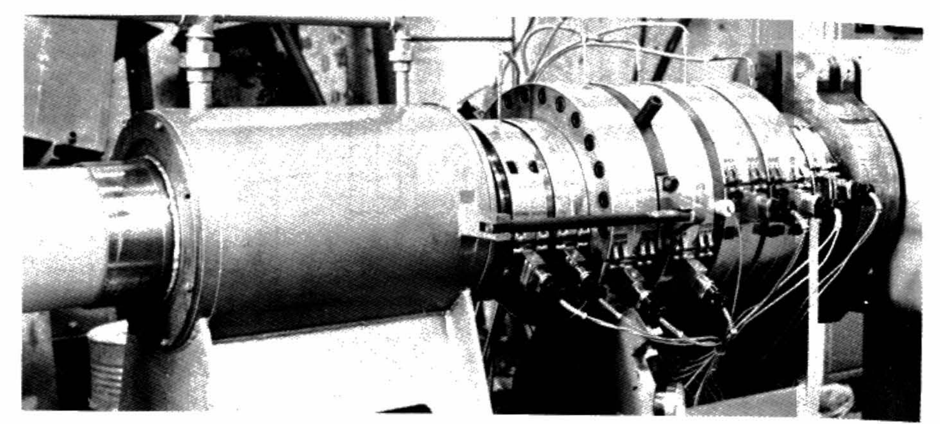
Fig. III-67

Fig. III-66

Co-extrusion. Fabrication d'un film ou d'une gaine cylindrique


Fig. III-70 a — Filière de calibrage

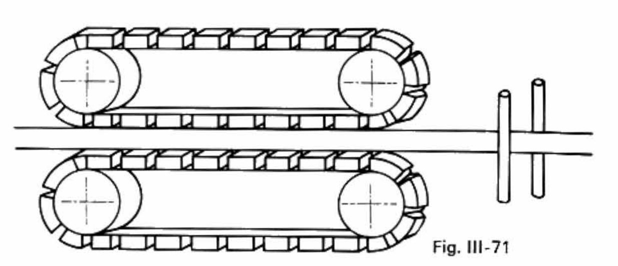

Fig. III-70 b — Mandrin de calibrage


Calibreur de tubes à la sortie d'une extrudeuse (*A. Olier*)

— *un bac de refroidissement ;*
— *un dispositif d'étirage,* le plus souvent à chenilles (fig. III-71) ;
— *un tambour de stockage.*

Pour les tubes ou profilés rigides, une tronçonneuse coupe le profilé en tronçons de longueur constante.

Les monofilaments de polyéthylène haute densité ou de polypropylène, sont fabriqués à l'aide d'une extrudeuse dont la tête d'équerre produit un film plat qui est refroidi et découpé en bandelettes ; celles-ci passent sur deux jeux de poulies tournant à des vitesses différentes de façon à


Fig. III-71

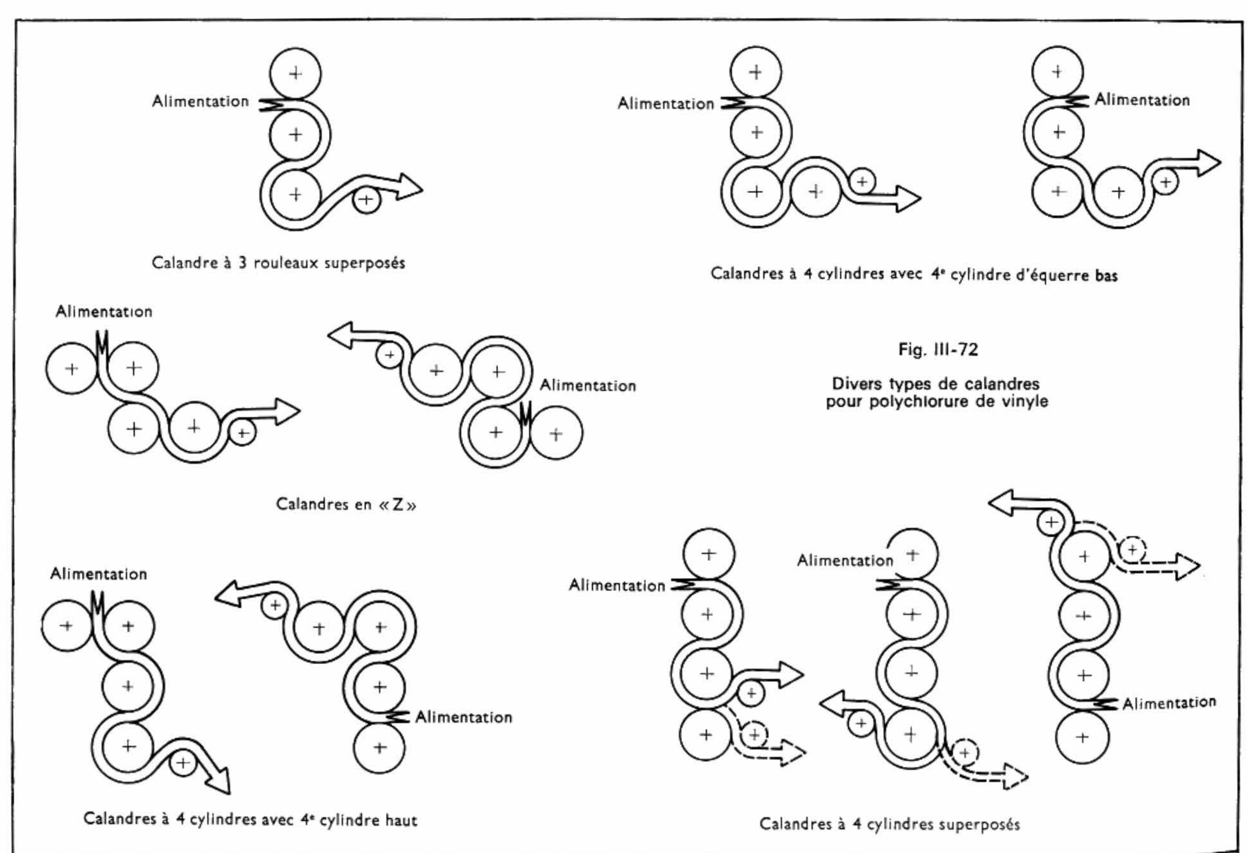


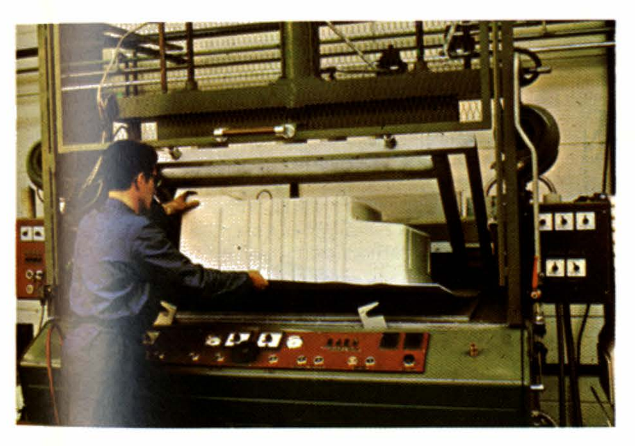
Fig. III-72
Divers types de calandres pour polychlorure de vinyle



Plastiques

Ci-contre, atelier de compounds vinyliques.

Ci-dessous, autoclaves pour la polymérisation du chlorure de vinyle.

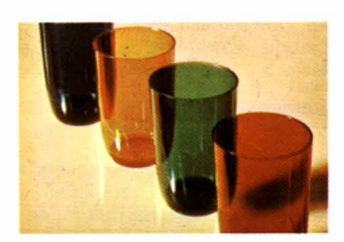


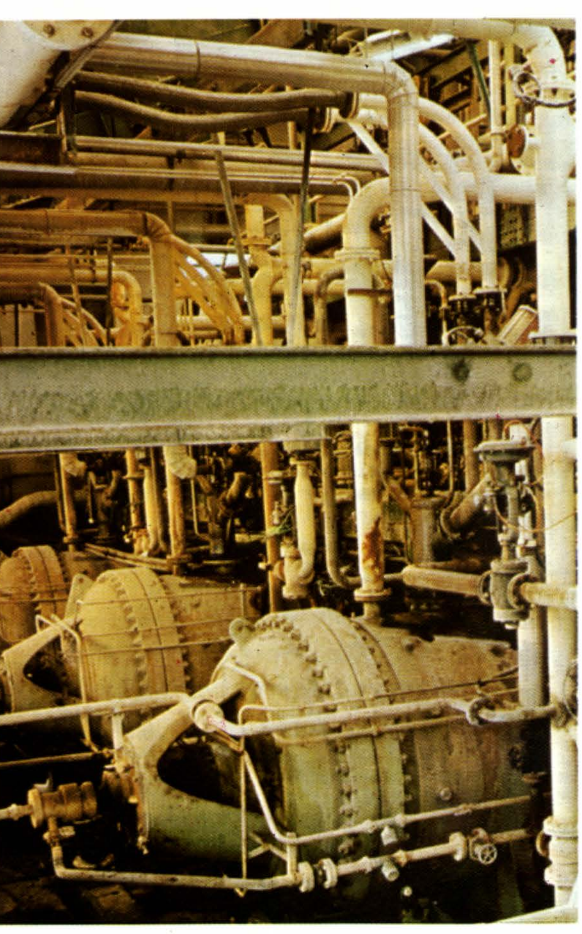
Ci-dessus, opération de thermoformage.

Ci-contre, à gauche, bacs en polystyrène.

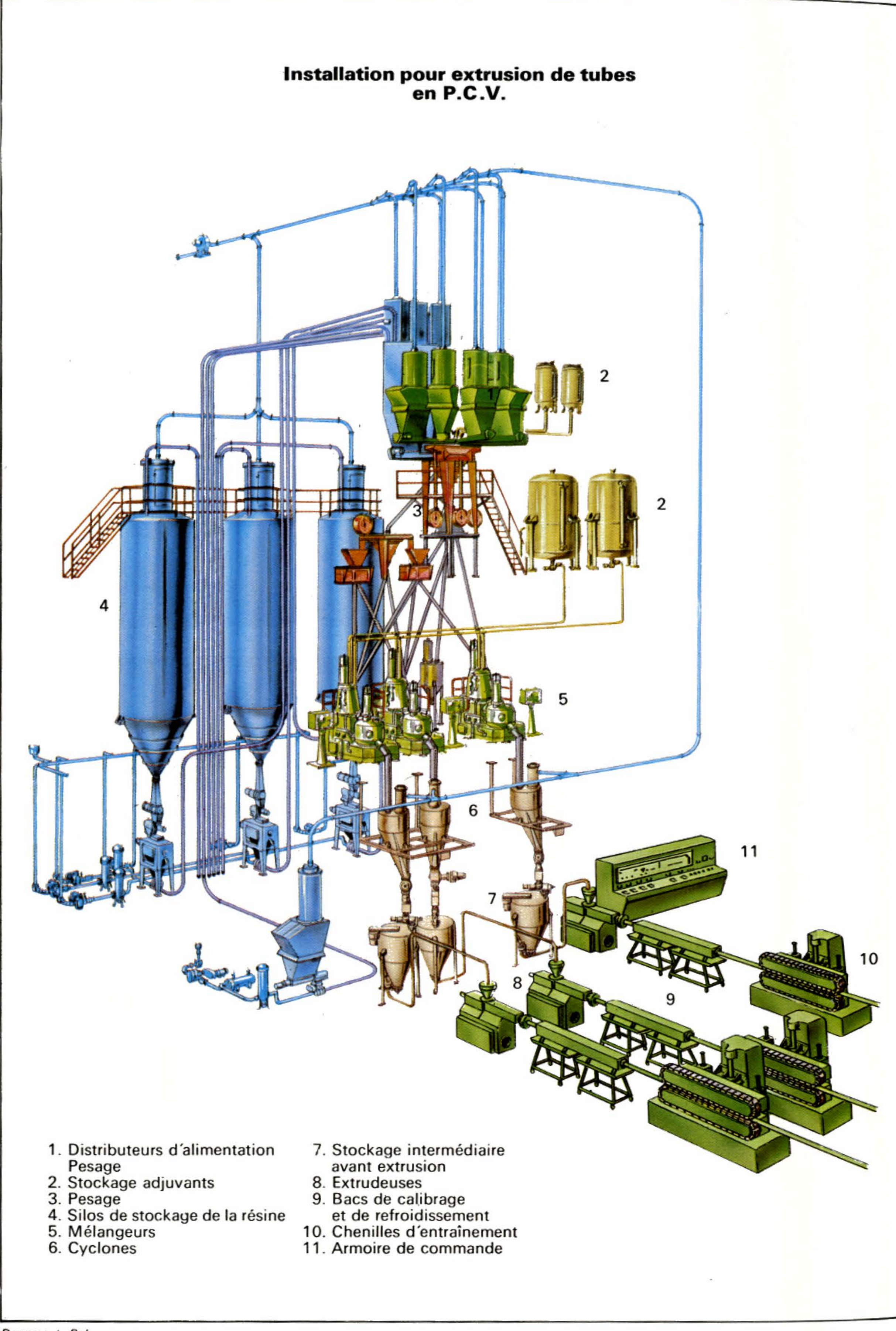
Ci-dessous, gobelets en SAN.



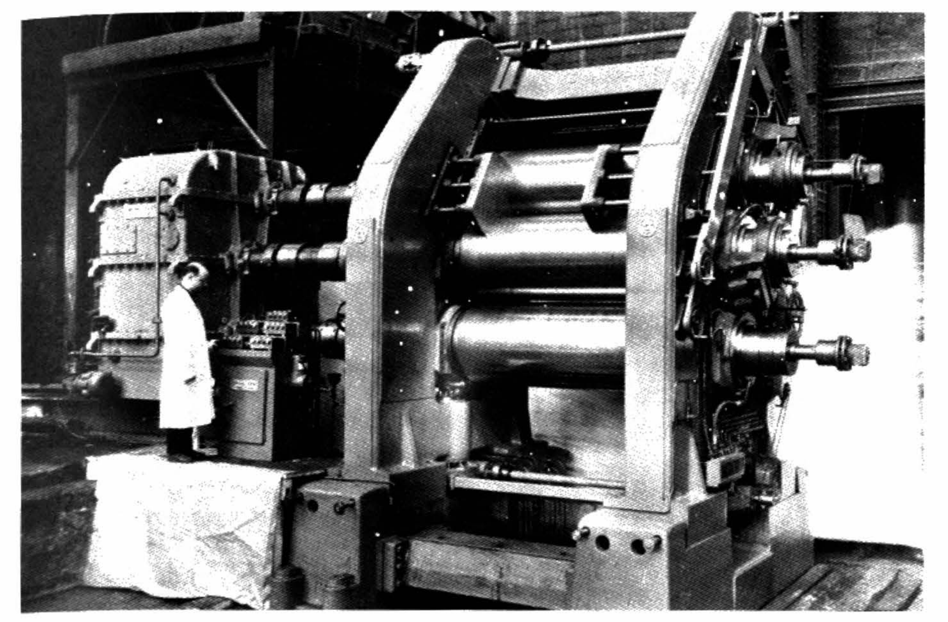




Photos : Rhône-Poulenc, ATO Plastique.



Document : Polysius



Calandre
(*A. Olier*)

provoquer un étirage important. Les bandelettes étirées sont ensuite envoyées sur des bobines de stockage.

La fabrication des tubes est une activité importante des extrudeurs et le schéma hors-texte donne un exemple d'installation complète destinée à l'extrusion de tubes en PCV. Une telle installation comporte l'approvisionnement, le dosage automatique, la composition automatique des mélanges, les mélangeurs, les extrudeuses et leurs accessoires d'étirage.

2.4. Calandrage. — Le calandrage est une méthode de mise en œuvre, qui permet de fabriquer des films continus d'épaisseur contrôlée, par passage d'une matière thermoplastique entre des cylindres dont les axes sont parallèles.

2.4.1. Produits calandrés. — Utilisé depuis longtemps pour le caoutchouc, le calandrage est appliqué actuellement de façon courante à certaines matières thermoplastiques et particulièrement au PCV plastifié, qui représente une grande partie de la production des industries qui exploitent cette technique; autres produits calandrés: le PCV rigide, les copolymères acétate-chlorure de vinyle, le polyéthylène.

2.4.2. Matériel utilisé. — Les calandres sont des machines de grande production, précises et coûteuses. Actuellement il est possible d'obtenir, par exemple, des films de 0,05 mm d'épaisseur et de 1,68 m de largeur, à des vitesses de 100 m par minute avec des tolérances de 3 micromètres.

Une calandre comporte généralement quatre cylindres. Les cylindres sont répartis de façon très différente suivant les types (fig. III-72). Le chauffage et la régulation de la température des cylindres sont assurés par circulation de fluide, ce qui permet de les refroidir pour les grandes vitesses de calandrage.

Les principaux problèmes inhérents au calandrage résultent des très grands efforts exercés par la matière au cours de son passage entre les cylindres et des difficultés d'obtention d'une température uniforme le long des cylindres. Les efforts radiaux résultant du fonctionnement normal de la calandre provoquent un fléchissement des cylindres, de sorte que pour éviter une diminution de l'épaisseur du film entre le centre et les bords, on est amené soit à prévoir des cylindres bombés, soit à croiser légèrement leurs axes.

2.5. Le soudage

2.5.1. Principe. — On appelle soudage l'opération qui consiste à assembler deux éléments de même nature (plaques, feuilles, objets) en chauffant les surfaces en contact. Cette opération ne peut être réalisée que si les matériaux sont susceptibles de s'amollir par échauffement, donc sont thermoplastiques. La zone d'assemblage par soudage s'appelle « soudure ». La soudure est le résultat de l'emmêlement des chaînes dont les tronçons sont agités par suite de l'augmentation de leur énergie d'activation thermique à l'interface de l'assemblage. Le mécanisme d'association au niveau moléculaire est très voisin de celui du collage, dans lequel les chaînes sont libres de se déplacer et de conduire à un « feutrage moléculaire » grâce à leur mise en solution.

2.5.2. Produits soudés. — Toutes les matières plastiques peuvent être soudées plus ou moins facilement, à l'exclusion du polytétrafluoréthylène qui pose des problèmes particulièrement difficiles à résoudre. Les nombreuses méthodes de soudage ne sont pas toutes applicables à toutes les matières thermoplastiques; le soudage par pertes diélectriques, par exemple, conduit à des résultats intéressants avec le PCV plastifié; il ne convient absolument pas pour l'assemblage du polyéthylène, dont la tangente de l'angle de pertes est beaucoup trop faible.

2.5.3. Méthodes de soudage. — Le soudage peut se faire avec ou sans apport de matière.

1° *Avec apport de matière*

a) *Soudage à l'air chaud au chalumeau*

Emploi : ce procédé est souvent employé pour souder les plaques de PCV dont les épaisseurs sont comprises entre 0,5 mm et quelques millimètres. On peut souder également du PE ou du PP.

Principe : les parties à souder sont chauffées au moyen d'un jet d'air chaud; température: 80 à 300 °C; pression: 0,1 à 0,5 bar.

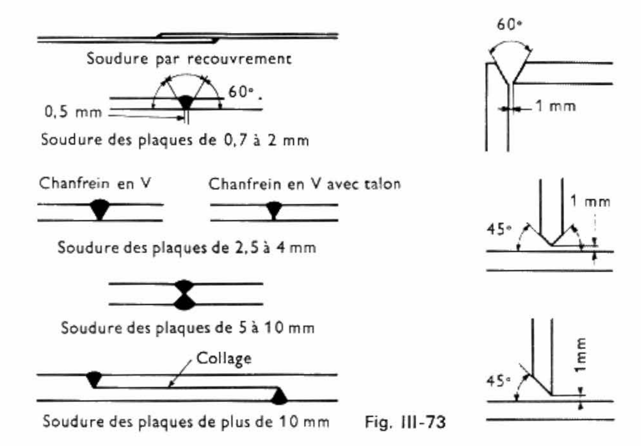


Fig. III-73

Préparation des bords du joint :

— Épaisseur inférieure à 1 mm : pas de chanfrein, un bon dressage suffit.

— Épaisseur supérieure à 1 mm : un chanfrein est nécessaire (V. fig. III-73).

Baguette de soudure :

— Obtenue par extrusion, la section la meilleure est **circulaire ;** elle se fait aussi en section triangulaire ou rectangulaire ; la baguette est de nature identique à celle du matériau à assembler.

— Le pourcentage de plastifiant dans le PCV ne doit pas excéder 12 % car une teneur supérieure donne une fusion trop rapide et une résistance mécanique médiocre.

Mode opératoire :

— Faibles épaisseurs : une seule passe suffit.

— Fortes épaisseurs : on prévoit des passes successives après une passe avec un fil de diamètre inférieur à 2 mm pour renforcer la racine. Il est nécessaire de gratter les parties noircies pour avoir une bonne homogénéité de la soudure ; on préfère souder en faisant des passes avec des fils de gros diamètres. Il faut pointer les plaques en partant des extrémités de la soudure. Les plaques à souder sont maintenues sur un marbre par des règles en acier. La baguette est taillée en biseau, à 60° environ. Le déplacement est prévu de la gauche vers la droite. La vitesse de soudage est comprise entre 1 et 4 m/mn (fig. III-74).

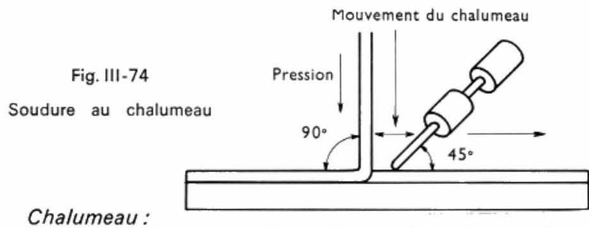


Fig. III-74

Soudure au chalumeau

Chalumeau :

— C'est un échangeur de chaleur, qui fait intervenir un gaz combustible et un fluide transportant le gaz chaud au droit des parties à assembler.

Le fluide chauffant : air (parfois azote ou gaz carbonique) parcourt un tube en acier inoxydable porté à haute température par :

— la combustion d'un gaz (gaz de ville, butane, propane, acétylène ; fig. III-75) ;

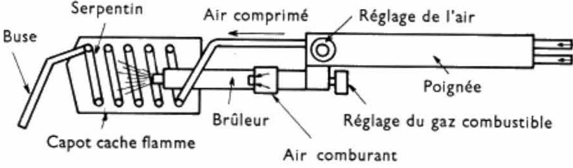


Fig. III-75 — Chalumeau à gaz combustible

— des résistances électriques alimentées généralement sous une tension de 24 volts, un transformateur permettant le réglage de la puissance (fig. III-76).

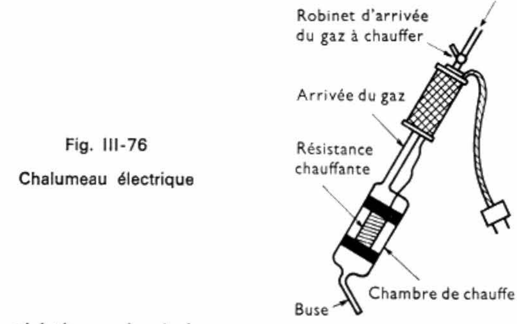


Fig. III-76

Chalumeau électrique

Caractéristiques du chalumeau :

— Débit d'air variant de 3 à 8 l/mn à 120 °C ; de 12 à 20 l/mn jusqu'à 250 °C.

L'air est fourni par un compresseur sous une pression de quelques bars ou par une bouteille portative (4 bars). On réduit la pression d'air (ou d'azote) entre 0,5 à 1 bar au départ au moyen d'un mano-détendeur. Une vanne de réglage, placée sur le chalumeau, permet d'obtenir la température désirée.

La température de l'air, mesurée à 5 mm de la buse, varie de 200 à 270 °C pour les usages courants. Le jet d'air chaud est utilisable à 20 mm de la buse, l'effet maximal étant obtenu à 100 mm de celle-ci.

Accessoires :

— Une plaque plane en marbre ou en glace trempée sur laquelle on assemble les parties à souder.

— Des règles métalliques très lourdes, pour maintenir les bords parallèles à distance convenable et faire écran de chaleur pour éviter que les plaques minces ne se gondolent sous l'action de l'air chaud. On utilise parfois un guide à roulette.

b) *Par extrusion d'un fil.* — Soudage en continu de films de polyéthylène par extrusion, à 250 °C, d'un mince profilé de polyéthylène entre les faces d'assemblage. Ce profilé transmet ainsi sa chaleur aux parties à souder ;

— épaisseur des films : $\frac{3}{100}$ mm ;

— vitesse de soudage : 7 m/mn.

Extension aux feuilles épaisses et aux papiers doublés.

2° *Soudage sans apport de matière*

a) *Soudage par conduction directe.* — Dans ce procédé, les deux bords des plaques ou profilés à assembler sont mis en contact direct avec une lame chauffante, puis pressés l'un contre l'autre pour exécuter la soudure. Ces deux opérations peuvent être successives ou simultanées.

• *Soudage par conduction directe simple (au miroir) :*

Principe : on utilise une lame chauffée électriquement entre 150 et 300 °C, de longueur supérieure à celle de la soudure à réaliser et maintenue très propre par des nettoyages fréquents avec des solvants appropriés à la matière chauffée.

Mode opératoire : On applique les deux bords du joint de part et d'autre de la lame jusqu'à obtenir la fusion ; on enlève alors rapidement la lame et l'on presse les parties l'une contre l'autre pour réaliser la soudure.

Applications : Ce procédé très simple permet la réalisation :

— de courroies sans fin en PCV ;

— de flacons en polyéthylène (la lame chauffante est alors circulaire et sert à souder les fonds à une température comprise entre 115 et 120 °C) ;

— de boîtes de semi-conserves en polystyrène.

• *Soudage par conduction directe en continu :*

Principe : Les bords des feuilles à assembler glissent sur des pannes en cuivre chauffées électriquement et provoquent leur ramollissement. Les bords sont alors pris entre deux molettes qui assurent le soudage par pression des bords.

Mode opératoire :

— Vitesse de soudage : 0,7 à 1,5 m/mn (pour comparaison : vitesse de couture à la machine à coudre : 1,5 à 7 m/mn) ;

— pression : voisine de 10 bars ;

— température de chauffage : 300 à 350 °C ;

— épaisseur des feuilles : de 0,15 à 1,5 mm (pour les épaisseurs plus faibles, « collage » sur les éléments chauffants).

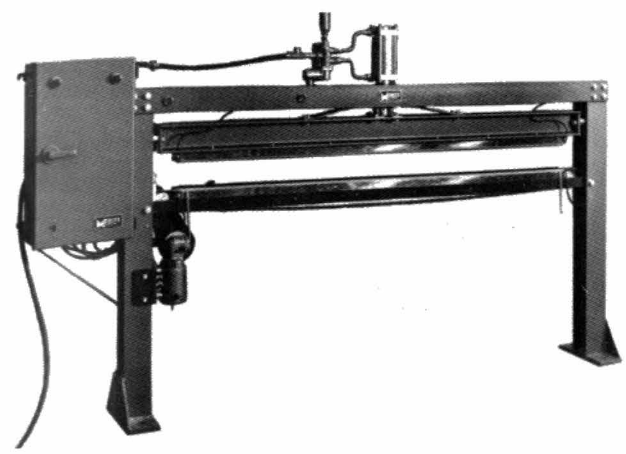
Applications : On obtient des soudures de résistance très grande, voisine de 85 % de celle de la feuille. La largeur moyenne de soudure étant de 5 à 6 mm contre 1,5 mm pour la soudure par haute fréquence, on diminue ainsi les risques de décomposition superficielle.

On peut réaliser des rayons de courbures minimaux de 50 à 60 mm.

Remarque : Le soudage bord à bord est possible avec rubans de recouvrement, par simple superposition et par superposition avec repliage et fronçage.

b) *Soudage par impulsions thermiques en conduction directe*

Principe : Les bords des feuilles à assembler sont pris entre deux mâchoires comportant une source de chaleur et pouvant être reliées à une source froide ; les mâchoires réalisent le chauffage, la pression assurant le soudage et éventuellement le refroidissement accéléré.



Machine à souder par impulsion (1,60 m de longueur utile de soudure) (*Moritz*)

Mode opératoire : Les feuilles sont chauffées sur un ou deux côtés à la fois, suivant leurs épaisseurs (entre 0,08 et 0,2 mm). La puissance des éléments chauffants est voisine de 300 W/cm² pour un temps de chauffe de 0,25 à 2,5 s à partir de la fermeture des mâchoires. La pression de serrage à réaliser dépend de la surface du joint. Le refroidissement, facultatif, dépend de la fabrication. Les mâchoires sont faites généralement d'un profilé d'aluminium garni de caoutchouc silicone. Le plus souvent, l'élément chauffant est une bande résistante mince, en contact avec le joint par l'intermédiaire d'une fine couche de graisse silicone qui empêche le « collage » et réduit le gradient de température (elle augmente la vitesse de chauffage).

La forme des mâchoires doit assurer une évacuation des particules de graisses ou de liquides restant entre les parties à souder.

On remplace parfois la bande mince par un fil chauffant assurant dans l'ordre : le chauffage, le soudage, puis la coupe du bord de la soudure.

Applications : Ces machines se prêtent bien à l'automatisation pour les travaux de série à cycles automatiques et pour tous les emballages de conditionnement.

c) *Soudage par champ électrique haute fréquence.* — L'apport d'énergie thermique a lieu par pertes diélectriques. Cette technique ne convient évidemment qu'aux matières plastiques ayant des pertes diélectriques élevées. Celles-ci sont fonction de la constante diélectrique et de l'angle de pertes, caractéristiques elles-mêmes fonction de la fréquence et de la température, comme le montrent les courbes de la figure III-77. Les pertes dépendent également du champ électrique dont la valeur est en général difficile à déterminer exactement.

Données pratiques :

Pour les machines usuelles du commerce les puissances sont comprises entre 0,250 kW à 25 kW. Le champ électrique ne dépasse jamais 2 000 V/cm (pour éviter l'apparition d'arcs entre les électrodes ; un dispositif anti-arcs est parfois nécessaire). La fréquence pratique est de 5 à 40 MHz pour des réalisations moyennes. On atteint 120 MHz et plus dans des cas spéciaux de machines très perfectionnées.

La puissance perdue dans le diélectrique est égale à :

$$P = 2\,\pi\,U^2 . f . C_v . \varepsilon_r . \mathrm{tg}\delta$$

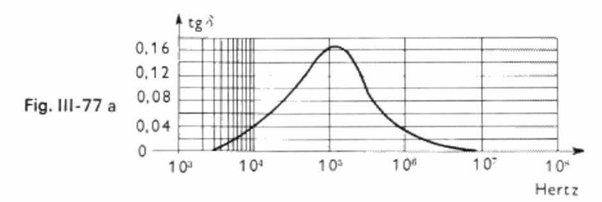
si nous appelons : U la valeur efficace de la tension permettant de produire le champ électrique, f la fréquence de cette tension, C_v la capacité du condensateur sans diélectrique, ε_r la permittivité relative du corps et δ l'angle de pertes de ce corps.

Générateur haute fréquence :

C'est un oscillateur alimenté sous une tension continue obtenue par redressement de la tension du secteur.

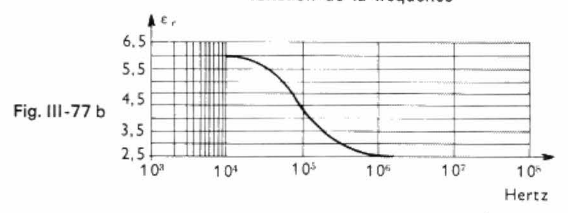
Électrodes : Les électrodes posent des problèmes de construction d'ordre mécanique et électrique. La construction des électrodes compliquées est en général confiée à des entreprises très spécialisées car les problèmes à résoudre sont très complexes. Quelques croquis d'électrodes ont été représentés sur la figure III-78. Matière : laiton. Tolérances de fabrication : 1/10 à 1/100 mm.

Fig. III-77 a



Variation de la tangente de l'angle de pertes en fonction de la fréquence

Fig. III-77 b



Variation de la permittivité relative ε_r en fonction de la fréquence

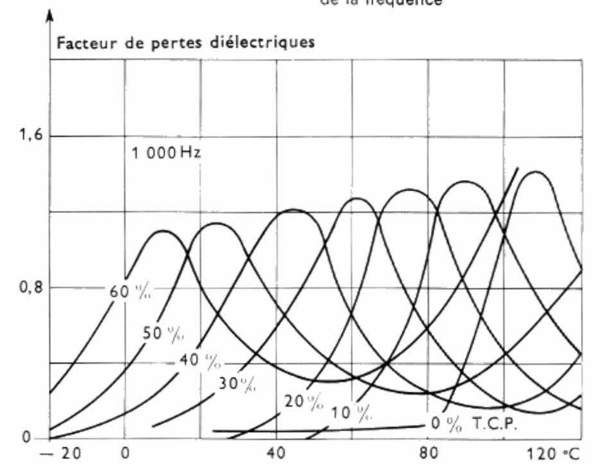


Fig. III-77 c — Influence de la température sur le facteur de pertes diélectriques du polychlorure de vinyle stabilisé pour des proportions variables de phosphate de tricrésyle

Remarque : L'antiparasitage est obligatoire pour éviter la transmission des ondes HF au réseau 50 Hz (brouillage).

Plastiques soudables par HF : De la lecture de ce qui précède il ressort la nécessité de procéder au préalable à une étude très sérieuse du matériau avant de se lancer dans le soudage par haute fréquence. La détermination du temps de soudage nécessite la connaissance des facteurs suivants : angle de perte, coefficient de perte, procédé de fabrication, plastifiant, caractéristiques de la machine utilisée. Il y a lieu de remarquer que le ramollissement diminuant l'épaisseur et la capacité augmente, la puissance et la fréquence diminuent ; tous les facteurs se modifient donc tout au long du cycle.

On pourra souder principalement les corps suivants : chlorure de polyvinyle, chlorure de polyvinylidène, polyacryliques, polyamides, polyuréthannes.

Les opérations sont donc :

— Réalisation de l'électrode correspondant au travail à exécuter ;

— Réglage de la machine en fonction des caractéristiques géométriques.

Le soudage peut ensuite se faire en série.

d) *Soudage par ultrasons.* — Contrairement aux autres méthodes, ce procédé de soudage ne nécessite de la part des matériaux, aucune propriété particulière. Il peut donc s'appliquer au soudage de presque tous les matériaux plastiques, même au soudage de matériaux différents.

Principe : Dans ce procédé de soudage, l'énergie électrique à haute fréquence est transformée en ondes ultrasonores. Les vibrations sont transmises à une sonotrode qui,

Fig. III-78

Électrode soudante et coupante simple

Électrode soudante et coupante laissant un bourrelet marginal

Électrode et contre-électrode pour soudage-coupage avec décor

Électrode pour la soudure d'un étui de peigne

Électrode cylindrique soudant le fond et le dessous d'un article tubulaire

Montage d'électrode pour le soudage des feuilles d'acétate de cellulose

à son tour, les transmet au matériau à souder. Le matériau martelé est alternativement pressé et décompressé. Sur les surfaces en contact, il se produit un aplatissement des aspérités par fluage, en même temps que l'expulsion de toute matière étrangère. Le frottement des molécules entre elles a pour effet de transformer l'énergie des ultrasons en chaleur, ce qui peut entraîner la fusion superficielle des matières en présence. Comme pour le soudage haute fréquence, la température la plus élevée est obtenue à l'interface.

Transducteur : Cet appareil transforme une énergie électrique haute fréquence en vibrations ultrasonores. L'énergie électrique est fournie par un générateur HF dont le signal électrique a une fréquence comprise, en général, entre 10 kHz et 40 kHz. Il existe deux types de transducteurs :

Transducteurs magnétostrictifs : Ils utilisent les propriétés magnétostrictives de métaux tels que le cobalt, le vanadium et le nickel (jusqu'à 22 kHz).

Transducteurs piézoélectriques : Ce sont des cristaux de quartz ou de titanate de baryum. On utilise parfois des céramiques à base de titanate ou de zirconate de plomb.

Machines utilisées : Elles sont constituées d'un robuste bâti, qui reçoit tous les organes nécessaires au soudage.

Presses : Toutes les machines sont équipées d'une presse destinée à appliquer l'outil sur le plastique à souder. Le dispositif est mécanique, hydraulique ou pneumatique, il permet d'obtenir des forces comprises entre 2 et 100 daN.

Caractéristiques techniques : Alimentation 220 et 380 V, en triphasé ou en monophasé. Le transducteur est toujours soumis à un refroidissement important pour éviter que la température ne s'élève trop.

Soudage proprement dit : La soudure par ultrasons est obtenue en plaçant les pièces à souder entre l'outil vibrant et une pièce massive appelée enclume. Le sens des vibrations doit être perpendiculaire au plan des joints. Après soudage, il est nécessaire de maintenir la pression pour que le refroidissement de la matière se fasse correctement. Il existe deux formes de soudage :

Soudage proche : L'outil vibrant épouse exactement la forme de la pièce et le contact se fait aussi près que possible du plan de joint.

Soudage éloigné : L'outil vibrant est en contact avec la pièce en un point éloigné du plan de joint. C'est la pièce qui véhicule l'énergie vibratoire. Dans les deux cas un soin tout particulier doit être apporté au dessin des surfaces en contact (fig. III-79) surtout si les soudures doivent être étanches.

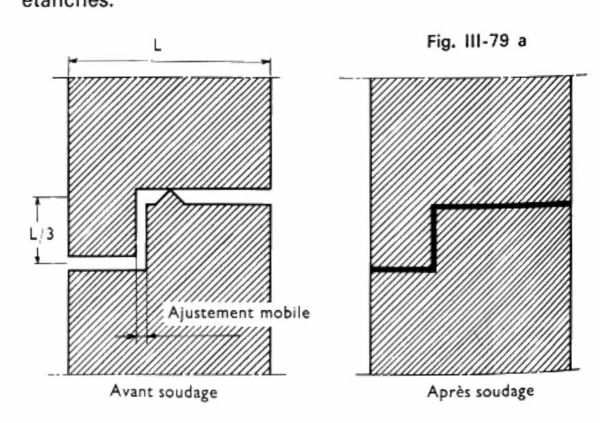


Fig. III-79 a

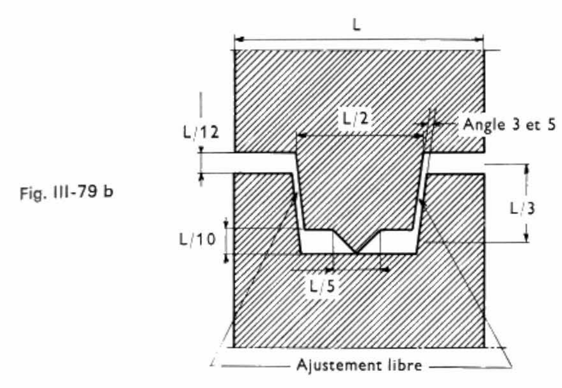


Fig. III-79 b

Application au soudage de films : Le soudage par ultrasons peut être employé pour l'assemblage de films. On fait défiler régulièrement les films à souder sur l'enclume, de telle sorte que la sonotrode martèle le joint et provoque l'échauffement nécessaire.

Autres opérations : Le matériel de soudage ultrasonique peut être employé pour d'autres opérations que celles qui viennent d'être décrites. Il peut être utilisé :

— pour introduire un prisonnier dans une pièce moulée (fig. III-80) ;
— pour dégrapper des objets injectés (fig. III-81).
— pour appliquer une bouterolle sur des rivets plastiques (fig. III-82) ;

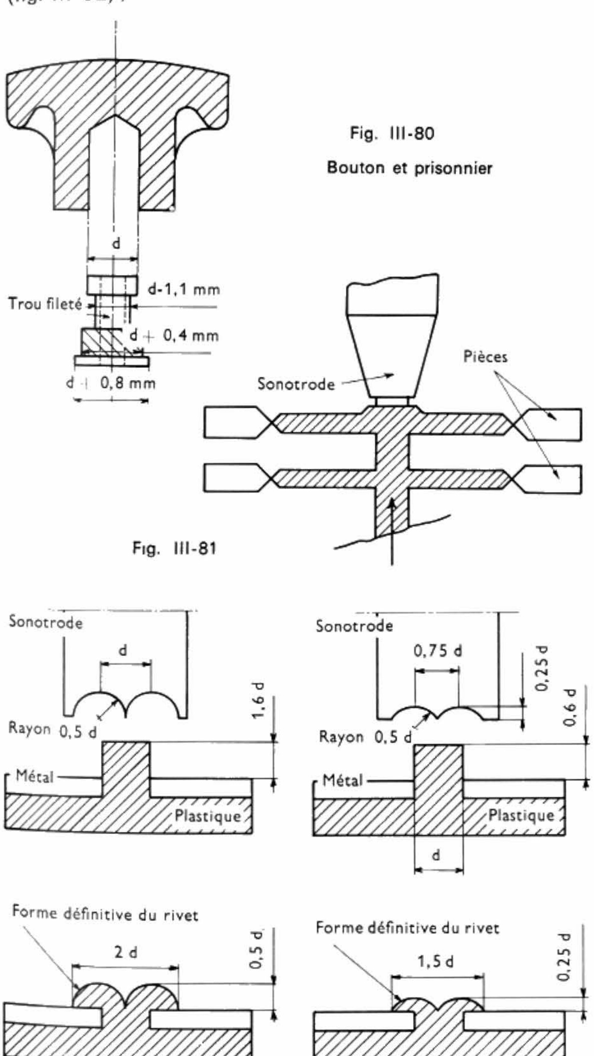


Fig. III-80
Bouton et prisonnier

Fig. III-81

Fig. III-82

Produits soudables par ultrasons : L'aptitude au soudage des différentes matières thermoplastiques est indiquée dans le tableau ci-après :

E : Excellent. B : Bon. P : Passable. D : Douteux.

Matière	Rivetage ou Insertion	Soudure	
		de près	de loin
Polystyrène	E	E	E
Polystyrène choc	E	E	B — D
Polystyrène fibre de verre	E	E	E
SAN	E	E	E
ABS	E	E	B
Polycarbonate (1)	E	E	E
Polyamide 6/6	E	B	P
Polysulfone (1)	E	B	B — P
Polyoxyméthylène	E	B	B
Polyméthacrylate de méthyle	E	E	B
Oxyde de polyphénylène	B	B	B — P
Polypropylène	E	B — D	P — D
Polyéthylène	E	B — D	P — D
Acétobutyrate de cellulose	B — P	D	D
Acétate de cellulose	B — P	D	D

(1) V. chap. 5

e) *Soudage infrarouge.* — Les films qui transmettent mal les rayonnements infrarouges, peuvent être chauffés et soudés à l'aide d'un émetteur infrarouge.

L'énergie absorbée provoque une élévation de température dans le volume irradié. Il y a des pertes par conduction et par convection à la surface. On soude souvent de cette façon deux films superposés ; dans ce cas, il faut qu'à l'interface on puisse atteindre la température minimale pour laquelle le soudage est rhéologiquement possible, sans dépasser, au niveau de la surface irradiée, la température de décomposition du matériau que l'on essaie de souder.

Remarque : Une solution possible consiste à utiliser un laser à gaz fonctionnant en continu. Le faisceau est monochromatique et peu divergent. Le rapport de la puissance rayonnée dans l'unité d'angle solide à la puissance totale consommée par l'émetteur, peut être beaucoup plus grand que pour les sources de lumière classiques (arcs ou lampes à filaments). L'absence d'aberration chromatique et la faible divergence, permettent de concentrer la lumière, par focalisation, dans une tache présentant une grande densité d'énergie. On dispose donc d'un émetteur puissant et très directif, qui est encore malheureusement assez coûteux.

Ce même laser peut servir à découper des films ou des tissus artificiels.

2.6. Technique des poudres

2.6.1. Principe. — Certaines poudres thermoplastiques placées au contact d'une surface métallique chauffée, peuvent fondre et s'agglomérer pour constituer une couche d'épaisseur sensiblement constante et qui possède, après refroidissement, des propriétés mécaniques suffisantes pour de nombreuses applications.

La chaleur est transférée à la poudre à partir de la surface chaude par conduction et l'épaisseur de la couche fondue dépend de la poudre utilisée, de la température de la surface, de la capacité calorifique du corps chauffé et de la durée de contact. La couche peut être fondue à l'extérieur d'un objet métallique ou à l'intérieur d'un moule chaudronné. La surface métallique peut être polie et enduite d'huile de silicone et l'objet formé au contact est démoulé ou bien la surface peut être sablée et dégraissée et la couche de thermoplaste fondu adhère à l'objet métallique. Cette technique sera donc employée pour fabriquer des objets ou pour revêtir des surfaces métalliques.

2.6.2. Produits utilisés. — La méthode sera employée surtout pour revêtir des surfaces métalliques et, dans ce cas, on peut employer des polymères cristallins : polyamides 11

(les autres polyamides ne sont pas couramment appliqués), polyéthylène, polymonochlorotrifluoréthylène ou polymères amorphes : acétobutyrate de cellulose, PCV plastifié (*dry blend*).

Dans ce dernier cas, il est nécessaire de déposer une couche d'accrochage sur la surface métallique que l'on veut revêtir.

2.6.3. Mode opératoire

1° *Fabrication d'objets*

a) *On utilise surtout alors le procédé « Engel »*, dans lequel un moule en tôle chaudronnée est rempli de poudre, placé à l'étuve et sorti après fusion d'une couche suffisante ; il est vidé du trop-plein de poudre et, après refroidissement, l'objet est démoulé. Cette technique, très intéressante pour la fabrication d'objets en petites ou moyennes séries, permet d'obtenir des pièces dont la surface extérieure est lisse, dont la surface interne est rugueuse, dont l'épaisseur est assez constante et dont les dimensions peuvent être très grandes (bateaux de quatre mètres de long). Le produit le plus utilisé est le polyéthylène haute densité.

b) *Moulage par rotation.* — La même technique peut être appliquée à des corps creux fermés, en utilisant des moules tournants, dans lesquels on met préalablement des produits fusibles. Cette technique s'applique dans de bonnes conditions à des mélanges de polyéthylènes de basse densité.

Dans les deux cas, le retrait des pièces est très important.

2° *Revêtement de surfaces.* — Plusieurs techniques peuvent être employées :

a) *Lit fluidisé.* — On peut plonger la pièce chaude que l'on veut revêtir dans un bac contenant la poudre constituant un lit fluidisé. La cuve est munie d'un fond poreux qui est réalisé en bronze fritté, en acier inoxydable fritté, en pierre poreuse, etc. Le gaz de fluidisation est le plus souvent de l'air, quelquefois de l'azote. On prend parfois la précaution de chauffer le gaz de fluidisation. La pièce chaude séjourne dans le lit fluidisé et la poudre fond au contact de la surface. La pièce est ensuite portée dans une étuve pour lisser la surface.

La méthode peut être automatisée dans les mêmes conditions que pour le revêtement au trempé avec des plastisols (V. chap. 4).

b) *Projection* (fig. III-83). — On utilise un pistolet (genre Schoop) à flamme oxyacétylénique ou à propane, qui permet de chauffer la surface à revêtir. La poudre, mise en suspension dans une cuve cylindrique, dans laquelle on a prévu une entrée d'air tangentielle, peut être projetée par le trou central du pistolet.

c) *Revêtement électrostatique.* — Le poudrage électrostatique fait appel aux mêmes principes que la

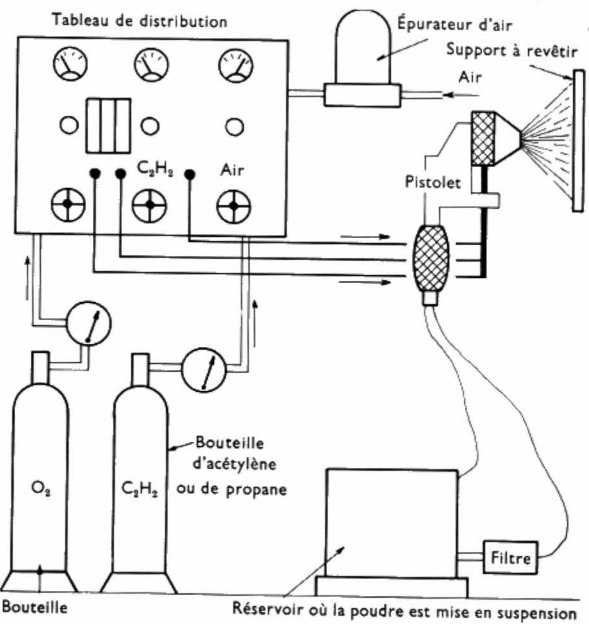


Fig. III-83 — Projection de poudre

peinture électrostatique. Le procédé consiste à créer, à l'aide d'un générateur électrostatique, un champ qui permet d'électriser des particules de poudre qui se déposent sur tout objet présenté dans sa zone d'influence. Ce procédé supprime les effets d'ombre ; une projection dans une seule direction suffit à recouvrir entièrement l'objet. Les particules chargées électriquement sont attirées par l'objet à recouvrir et on obtient ainsi un dépôt rapide et uniforme sur les objets à revêtir.

La charge électrique q prise par une particule est égale à :

$$q = K E_0 a^2$$

avec : E_0, champ électrique ; a, rayon moyen de la particule ; K, facteur dépendant de la géométrie de la particule et surtout de sa nature.

Pour les matériaux isolants, la valeur de K est comprise entre 1,5 et 2. La charge est donc proportionnelle à l'intensité du champ, la masse de la particule étant proportionnelle à a^3 ; plus la particule est petite, plus sa charge est grande par rapport à sa masse.

Chaque particule chargée est soumise à une force électrostatique $F = qE$, E étant le champ électrique existant au point où se trouve la particule considérée.

Les particules ont toutes des charges de même origine, elles se déposent régulièrement sans se recouvrir mutuellement sur la pièce à revêtir.

La poudre peut être appliquée sur la pièce froide, la couche de poudre déposée repousse les particules chargées qui se présentent, de sorte que l'on observe une épaisseur limite supérieure. La poudre, après fusion dans une étuve annexe, conduit à un dépôt d'épaisseur comprise entre 0,05 et 0,5 mm.

On peut déposer la poudre sur la pièce chauffée à des températures inférieures ou supérieures à la fusion ; la poudre déposée devient plus conductrice de l'électricité en s'échauffant au contact de la pièce chaude et il est alors possible de déposer une plus grande épaisseur de poudre. On peut arriver de cette façon à des épaisseurs de revêtement de 0,5 mm et plus.



Pulvérisation de polyéthylène greffé sur du métal pour réalisation d'un revêtement anticorrosion (*Publimages-Total*)

CHAPITRE IV

LES PRINCIPAUX PLASTIQUES COMMERCIALISÉS CARACTÉRISTIQUES — LIMITES D'EMPLOI MÉTHODES PARTICULIÈRES DE MISE EN ŒUVRE APPLICATIONS

Nous venons de voir les considérations les plus générales qui peuvent être formulées sur les plastiques examinés dans leur ensemble. *Nous avons essayé de montrer ce qu'ils avaient de commun;* nous allons voir comment leurs caractéristiques, leurs méthodes d'obtention ou leurs possibilités de mise en œuvre les différencient.

Jusqu'à maintenant nous avons considéré les *résines pures;* leurs propriétés sont souvent modifiées par des *adjuvants ;* nous verrons lesquels et pourquoi ils sont utilisés

Ensuite, nous examinerons successivement les différents *plastiques commercialisés,* en précisant les *qualités principales,* qui justifient leurs utilisations actuelles, ou permettent de prévoir des applications futures. Toutes les fois que cela sera nécessaire, nous entrerons dans le détail de leur mise en œuvre, en insistant particulièrement sur les *méthodes conduisant à des prototypes.* Nous laisserons volontairement de côté des grandes techniques de mise en œuvre: injection, extrusion, calandrage, formage, extrusion ou injection soufflage, en signalant seulement les conditions particulières d'application de ces techniques aux produits examinés.

Malgré tout l'intérêt des nouveaux matériaux, polysulfones, polyimides, etc., nous avons considéré en priorité les plastiques fabriqués industriellement, négligeant volontairement les élastomères. Toutes les fois que les produits ou semi-produits considérés ont conduit à des méthodes de contrôle spécifique (lamifiés, produits expansés) nous avons essayé d'en donner au moins l'esprit.

1. ADJUVANTS

Il n'est pas possible d'examiner en détail l'influence des adjuvants sur les caractéristiques des plastiques dans lesquels on les incorpore. Nous allons donc nous limiter à la *définition des qualités particulières* exigées des différents adjuvants en précisant, lorsque c'est possible, leur *mécanisme d'action.*

Il nous faut rappeler ici, qu'avant solidification, *l'introduction des adjuvants est plus généralement le fait des producteurs de matières plastiques,* plutôt que des transformateurs (excepté pour le PCV et les résines liquides). Les adjuvants les plus employés sont des plastifiants, des stabilisants, des colorants et des charges.

1.1. Plastifiants. — Ce sont des solides ou des liquides polymères ou non, de masse moléculaire faible. Ces petites molécules pénètrent entre les chaînes et diminuent les forces de Van der Waals.

1.1.1. Caractéristiques

1° Ils doivent *être compatibles* avec les résines dans lesquelles on les incorpore et ils ne doivent pas exsuder après incorporation.

2° Ils doivent *avoir une faible tension de vapeur* à température élevée. Pour la plupart des plastifiants, elle est seulement de quelques millimètres de mercure à 200 °C. La méthode ISO R 176 permet d'apprécier la volatilité des plastifiants par la méthode du charbon actif.

Remarque: Des brevets ont été pris sur l'utilisation d'un plastifiant temporaire. Par exemple, citons comme application, la mise en place de bandes de sécurité tubulaires minces. Elles sont trempées dans un liquide à température d'ébullition basse (le liquide ne doit pas dissoudre la bande mais la plastifier) et la bande devient élastique et déformable: on peut la mettre en place sur un ensemble que l'on veut rendre inviolable. Le « plastifiant temporaire » s'évapore et la pièce devient cassante: on ne peut pas l'enlever sans la rompre.

3° Il faut qu'ils soient *non migrants.* Si un polymère plastifié est au contact avec le même polymère ou un autre polymère, peu ou pas plastifié, on constate le passage du plastifiant du polymère le plus plastifié vers le moins plastifié. Les plastifiants sont plus ou moins migrants. La migration peut être contrôlée en utilisant la norme NF T 51-025. La migration s'accompagne souvent du déplacement des colorants.

4° Dans certains cas ils doivent être *non toxiques:* emballages alimentaires, usages médicaux (poches de transfusion sanguine). Le nombre de plastifiants autorisés pour l'usage alimentaire a été défini par une loi du 20 janvier 1954; citons: triphényl phosphate, phtalate d'octyle, phtalate de cyclohexyle, adipate d'octyle, sébaçate d'octyle, triheptanoate de glycol.

5° De plus il faut qu'ils soient *ininflammables et thermiquement stables.*

En dehors des caractéristiques précédemment citées, on détermine couramment:

6° *La solubilité dans l'eau* et les solvants, qui faciliteraient l'extraction par un liquide au contact avec le polymère plastifié.

7° *L'indice de réfraction,* qui permet en particulier de les identifier.

8° *La viscosité* qui semble jouer un rôle déterminant dans le comportement à basse température des polymères plastifiés. Pour des PCV plastifiés destinés à un emploi à basse température, il est préférable d'utiliser de grandes quantités de plastifiant de viscosité élevée que de petites quantités de plastifiant fluide.

9° On mesure également *les caractéristiques diélectriques* du plastifiant, surtout lorsque le polymère est destiné à être utilisé comme isolant. La mesure est faite à l'aide d'un éclateur à boules, appelé encore Spintermètre (fig. IV-1); il est logé dans une cellule réalisée dans un matériau isolant, par exemple, une résine époxy moulée.

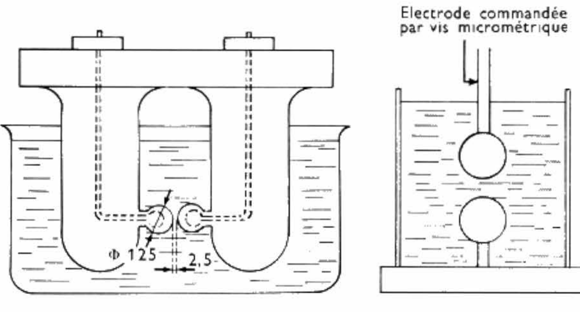


Fig. IV-1

L'influence de l'humidité est prépondérante. On a pu visualiser et photographier la formation de gouttelettes d'eau venant se placer suivant les lignes de champs entre les électrodes.

1.1.2. Principaux plastifiants. — Les principaux plastifiants sont des phtalates, des adipates, des sébaçates d'alcoyle, des arylphosphates, des hydrocarbures aromatiques, des paraffines chlorées, etc.

1° *Phtalates*

$$C_6H_4\begin{cases} -\overset{\displaystyle O}{\overset{\|}{C}}-O-C_n\,H_{2n+1} \\ -\underset{\displaystyle O}{\underset{\|}{C}}-O-C_n\,H_{2n+1} \end{cases}$$

Noms	Nombre d'atomes de carbone	Abréviations
Diméthyl phtalate	1	DMP
Diéthyl phtalate	2	DEP
Dibutyl phtalate	4	DBP
Butyl nonyl phtalate	4 - 9	BNP
Diheptyl phtalate	7	DHP
Dioctyl phtalate ou Di 2 éthyl hexyl phtalate (1) .	8	DOP
Dinonyl phtalate	9	DNP
Didécyl phtalate	10	DDP

(1) $-\underset{|}{\overset{CH_2H_5}{CH}}-(CH_2)_4-CH_3$

2° *Phosphates d'Aryl* (*Ar*: noyau aromatique)

$$O=P\begin{cases} -O-Ar \\ -O-Ar \\ -O-Ar \end{cases}$$

Noms	*Ar*	Abréviations
Tricrésyl phosphate ..	$-C_6H_4-CH_3$	TCP
Diphényl crésyl phosphate ..	$-C_6H_5$ 2 fois ; $-C_6H_4-CH_3$ 1 fois	N.C. (Santi cizer 140 Monsanto)
Triphényl phosphate ..	$-C_6H_5$	TPP

3° *Adipates*

$$\begin{array}{l} O \\ \| \\ C-O-C_n\,H_{n2+1} \\ | \\ (CH_2)_4 \\ | \\ C-O-C_n\,H_{2n+1} \\ \| \\ O \end{array}$$

Noms	Nombre d'atomes de carbone	Abréviations
Di isodécyl adipate	10	DDA
Di octyl adipate	8	DOA
Di (n-octyl, n-décyl) adipate .	8 - 10	

4° *Sébaçates*

$$\begin{array}{l} O \\ \| \\ C-O-C_n\,H_{2n+1} \\ | \\ (CH_2)_8 \\ | \\ C-O-C_n\,H_{2n+1} \\ \| \\ O \end{array}$$

Exemple :

Nom	Nombre d'atomes de carbone	Abréviation
Di butyl sébaçate	4	DBS

On utilise aussi des citrates, des stéarates, des glycolates, des salicylates, des oléates et, de plus, des plastifiants polymères : polyester, polyisobutylène (vistanex, oppanol) dans le PE.

Remarque : On divise habituellement les plastifiants en :
— *plastifiants primaires,* qui sont compatibles jusqu'à 150 % en masse par rapport à la résine ;
— *plastifiants secondaires,* qui sont moins compatibles que les premiers et qui sont en général mélangés avec eux pour modifier une propriété du mélange.

1.1.3. Extendeurs. — Les extendeurs sont des corps peu ou pas compatibles qui peuvent être introduits en petite quantité dans les plastifiants vrais, de façon à abaisser les prix. Les extendeurs les plus courants sont les cires chlorées, les diphényl chlorés, les naphtalène chlorés et certaines huiles.

1.1.4. Lubrifiants. — Ils sont introduits dans les poudres à mouler pour faciliter l'écoulement dans les moules (PS). Les stabilisants du type stéarate, que nous verrons plus loin, sont en même temps des lubrifiants.

1.2. Stabilisants. — La décomposition des polymères sous l'action de la chaleur et des rayonnements U.V., I.R., etc., peut être ralentie par un produit utilisé en faible quantité appelé *stabilisant,* que l'on incorpore dans la résine.

1.2.1. Qualités exigées des stabilisants

1° Compatible avec la résine et les autres adjuvants.
2° Réflecteur des rayonnements nuisibles (exemple : carbonate basique de plomb).
3° Non toxique, surtout pour les usages alimentaires (exemple : PCV-bouteilles d'huile, tuyaux d'adduction d'eau).
4° De teinte claire.
5° D'un prix non prohibitif.

1.2.2. Contrôle de l'efficacité des stabilisants. — Les mécanismes de dégradation et par suite de stabilisation sont complexes et souvent mal connus.

1° On peut étudier expérimentalement l'action des stabilisants en suivant, par exemple, les modifications de coloration du polymère, dont on veut éviter la décomposition. Dans ce but des mesures photométriques par réflexion (fig. IV-2) permettent de suivre la discoloration en fonction du temps, par comparaison avec deux échantillons témoins.

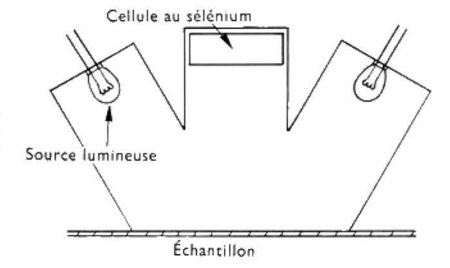


Fig. IV-2
Contrôle d'un stabilisant par une méthode photométrique

2° On peut étudier la dégradation thermique de l'échantillon en contrôlant sa transparence dans l'U.V. ou

en établissant périodiquement le spectre correspondant à la transmission dans l'infrarouge. Le même spectre permet de suivre la disparition progressive du stabilisant.

Enfin, de nombreuses études ont été consacrées au dosage des produits de décomposition (acide chlorhydrique pour le PCV par exemple).

1.2.3. Principaux stabilisants. — Les principaux stabilisants peuvent être classés en :

1° *Sels d'acides organiques*

a) *Sels d'acides gras :* stéarates, laurates, ricinoléates ;

— *les stéarates* $(C_{17}H_{35}\ COO)_n^-$ $(M)^{n+}$ des métaux M suivants :

Al^{3+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Na^{1+}, Cd^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Ba^{2+}

— *les laurates* $(C_{11}\ H_{23}COO)_n^-$ $(M)^{n+}$ des métaux suivants :

Sn^{2+}, Sn^{4+}, Ba^{2+}, Cd^{2+}

b) *Autres sels d'acides organiques :* maléates, phtalates, naphténates, silicates.

2° *Composés organométalliques* avec prédominance très nette des dérivés de l'étain : laurate et maléate d'étain dibutyle.

3° *Huiles de soja ou huiles de ricin époxydées*, c'est-à-dire des huiles comportant des doubles liaisons qui s'ouvrent en présence d'un agent oxydant, l'acide peracétique, par exemple :

$$-CH_2-HC=CH-CH_2- \rightarrow -CH_2-HC-CH-CH_2- \quad (\text{pont } O \text{ entre les deux } CH)$$

Ces derniers produits peuvent être mis en quantité non négligeable et ils jouent alors le rôle d'un plastifiant.

1.2.4. Phénomènes de synergie. — Les stabilisants sont rarement utilisés seuls. On les associe les uns aux autres, de façon à obtenir des effets synergétiques c'est-à-dire que l'on recherche des associations de stabilisants qui soient plus efficaces que chacun des composants. Les associations synergétiques connues sont limitées en nombre et elles correspondent à des pourcentages précis des constituants. Parmi les plus connues citons celles des stéarates de baryum et de cadmium ou cadmium-plomb ou plomb-aluminium ou plomb-sodium. Par ailleurs, on utilise quelquefois des mélanges ternaires.

1.2.5. Mécanisme de la stabilisation. — Dans les dérivés chlorés (PCV par exemple) où il y a un dégagement d'acide chlorhydrique au moment de la décomposition, il y a formation de doubles liaisons chromophores qui sont conjuguées et par suite possèdent une action bathochrome. Cet acide chlorhydrique semble avoir une action catalytique sur la décomposition du PCV. On pourrait donc supposer que la neutralisation de l'acide chlorhydrique formé doit constituer le rôle principal du stabilisant (c'est le cas des sels de plomb et des sels d'alcalino-terreux). En réalité, le dégagement d'acide chlorhydrique est plus important dans un PCV stabilisé que dans un PCV sans stabilisant. On pense donc que l'action des organostanniques, par exemple, est liée à la fixation de radicaux sur les doubles liaisons conjuguées.

1.3. Colorants et pigments. — Pour conférer aux résines une couleur désirée, on incorpore dans leur masse des colorants organiques ou des pigments.

1.3.1. Les colorants sont des produits organiques solubles dans les solvants ou dans les résines (plasto solubles). Leur masse volumique est comprise entre 1,2 et 1,4 g/cm³ ; ce sont des composés à groupement chromophore.

1.3.2. Les pigments insolubles sont mélangés par malaxage aux résines et aux charges, ce sont des produits organiques ou minéraux, des oxydes ou des sels de métaux utilisés pour leur couleur, leur pouvoir couvrant, leur opacité. Leur masse volumique est très variable, de 1,2 à 2 g/cm³ pour les organiques et de 1,8 à 9 g/cm³ pour les minéraux.

Les laques sont des pigments particuliers obtenus par fixation d'une matière colorante soluble, naturelle ou artificielle sur un support généralement minéral (alumine). Les laques sont peu employées dans les plastiques. Les colorants doivent résister à la température de mise en œuvre, 120 °C à 160 °C environ pour le formage, 140° C à 300 °C dans certains cas, pour l'injection et l'extrusion.

Les granulés, les poudres à mouler, les poudres pour fluidisation sont le plus souvent colorés par l'entreprise qui a fabriqué la résine, mais dans certains cas, les transformateurs colorent eux-mêmes leurs produits :

— plastisols, « prémix » polyesters, au cours du mélangeage, dans un Werner (V. chap. 4, § 2.1.3) ;

— compositions vinyliques, sur un mélangeur à cylindres ;

— PS, AC, ABC, etc. dans un mélangeur à sec, quelquefois simplement un tonneau métallique entraîné en rotation.

Le pigment ou le colorant tapisse l'extérieur des granulés et le mélange se fait à chaud dans le dispositif de plastification de la presse ou dans le corps de la boudineuse.

Teintures. — Il est possible de teindre les objets en CA et PA, c'est-à-dire les matériaux hygroscopiques. De plus, le PMMA peut être teint avec des colorants dissous dans un mélange eau distillée-acétone.

1.4. Charges et produits de renforcement. — Les caractéristiques mécaniques des résines peuvent être considérablement modifiées par l'introduction de produits minéraux ou végétaux appelés *charges*. On peut en particulier améliorer leur dureté superficielle, leur résistance au rayonnement et leur stabilité dimensionnelle en leur ajoutant des charges granulaires ; on augmentera leur rigidité et leur résistance à la rupture, en ajoutant des charges fibreuses et on réalise des stratifiés, à l'aide de produits de renforcement en feuilles.

1.4.1. Charges granulaires. — Les charges sont caractérisées par leur géométrie, leur profil granulométrique et leur nature. Les charges granulaires diminuent les allongements de rupture en traction et même la contrainte de rupture ; elles réduisent souvent aussi la résistance au choc. Au contraire, la résistance en compression et la dureté peuvent être améliorées et le retrait des produits coulés diminue au fur et à mesure que croît le taux de charge.

Les charges utilisées, aussi bien minérales que métalliques ou organiques, sont très nombreuses :

a) *Minérales :*

— *Le carbonate de calcium*, utilisé dans les revêtements de sol en PCV et dans les premix polyesters.

— *La poudre d'amiante*, qui contient des traces de fer, qu'il faut éliminer pour les usages électriques ou pour charger des matériaux résistant aux acides.

— *Le mica.*

— *La vermiculite.*

— *Le kieselguhr*, qui est une farine de diatomées, conduisant à des propriétés électriques moins bonnes.

— *Le carbone*, sous forme de noir de gaz ou noir de fumée (carbon black) provenant de la pyrolyse des composés organiques cycliques. On en ajoute entre 2 et 30 % dans le polyéthylène où il sert de barrière contre les ultraviolets.

— *Le graphite colloïdal* qui améliore l'écoulement des matériaux dans les moules et diminue le coefficient de frottement des matériaux dans lesquels on l'incorpore. On en met de 0,5 à 5 % ou même plus, dans les polyamides, dans les formophénoliques, dans les PTFE et dans le polystyrène, dont il augmente la résistance au choc.

— *Le disulfure de molybdène*, MoS_2, qui est également utilisé comme charge lubrifiante ; on l'introduit en particulier dans les polyamides.

— *La poudre de verre*, surtout utilisée dans les élastomères.

— *Les billes de verre*, billes creuses de petit diamètre en verre employées sous le nom « d'eccosphères » aux États-Unis d'Amérique.

— *Les sels de baryum* (sulfate de baryum ou baryte) *et de plomb* qui constituent des charges pour la réalisation d'écrans, en particulier en radiologie.

— *Les charges de silice*, finement divisées, employées

(0,5 à 2 %) surtout dans les polyesters et les éthoxylines. Ces charges confèrent aux résines liquides des propriétés de *thixotropie*, ce qui facilite les opérations de réalisation d'un *gel coat*, par exemple (revêtement de la surface d'un moule réalisé avec un polyester coloré, qui sera à la surface de la pièce que l'on démoule).

Remarque : Rappelons que certains gels se transforment en sol par agitation et que la transformation inverse se produit lors d'un repos assez long (c'est notamment le cas des « sables mouvants »). Initialement cette transformation indéfiniment réversible, sol $\rightleftarrows$ gel, a servi de définition à la thixotropie.

Par extension, on qualifie de thixotropes des fluides qui restent liquides, mais dont la viscosité apparente η_a est une fonction décroissante de la vitesse de sollicitation et cela avec un certain retard (phénomène d'hystérésis ; fig. IV-3).

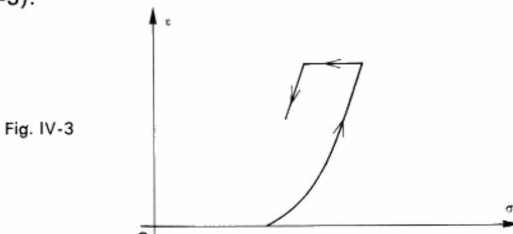


Fig. IV-3

b) *Métalliques.* — Des poudres de fer ou d'aluminium ont été utilisées, en particulier pour augmenter la conductivité calorifique des résines coulées polyesters et éthoxylines.

c) *Charges organiques.* — La possibilité d'ajouter un produit gratuit ou très peu coûteux à un produit cher a toujours semblé une opération d'un intérêt évident sur le plan économique. C'est pourquoi un nombre impressionnant de charges variées a été essayé : farine blanche de sabots ou de cornes, farine de soja, farine de coques et de noyaux de fruits : noix, amandes, abricots, noix de coco, olives, etc. L'intérêt suscité par ce problème a été augmenté par la disparition de débouchés traditionnels pour ces produits.

Farines de bois. — Les farines de bois sont les charges les plus utilisées, on préfère en général des farines de bois tendres, pins de Norvège, épicéa où seulement le cœur est utilisé à cause des résines incompatibles que l'on trouve dans l'aubier. Les farines subissent un examen granulométrique et on contrôle leur hygroscopicité, leur possibilité d'imprégnation par la résine, leur densité apparente, leur teneur en résine naturelle, leur couleur. Dans les formophénoliques, on utilise surtout des bois de peuplier broyés à l'aide de meules ; les particules ont des dimensions de 250 µm de long et quelques micromètres de diamètre. Dans les résines coulables on utilise également des sphères creuses de résines formophénoliques appelées « micro baloons ».

1.4.2. Charges fibreuses. — On améliore en général les caractéristiques mécaniques en incorporant des charges fibreuses dans les résines. Ces charges sont organiques, minérales ou métalliques.

1° *Différentes charges fibreuses*

a) *Charges végétales naturelles.* — On utilise des fibres de sisal, de chanvre, de jute, de ramie ou d'alpha cellulose traitée.

b) *Fibres synthétiques.* — On utilise des fibres de polyamides, de polyéthylène téréphtalate ou des fibres acryliques.

c) *Fibres minérales.* — La fibre la plus couramment employée est la fibre de verre.

— *Les fibres de verre.* Les propriétés du verre filé dépendent de la composition du verre et de la technique de fibrage. Parmi les verres très utilisés, on trouve le *verre E ou verre électrique*, qui est un borosilicate, pratiquement exempt d'alcali et le *verre A*, qui contient soude et potasse et qui est plus aisé à fibrer en raison d'une température de travail plus basse ; il est plus sensible à l'action de l'eau et impropre à la fabrication d'isolants diélectriques.

Propriétés du verre E : Module de Young : 79 000 N/mm² ; résistance en traction : 1 500 à 2 500 N/mm² ; $\frac{\Delta l}{l}$: 2 à 3 %.

Les verres peuvent atteindre des modules de 95 000 N/mm² et des résistances à la rupture de 4 500 N/mm².

L'état structural dépend de la vitesse de fibrage alors que les défauts superficiels sont fonction des vitesses de fibrage.

2° *Fabrication des fibres de verre.* — Le verre est fondu puis évacué par des canaux jusqu'à des machines à billes où sont fabriquées des billes de 20 mm de diamètre refroidies lentement. Les billes sont placées dans des creusets-filières à la sortie desquels on peut étirer mécaniquement des fibres continues appelées « Silionne » (fig. IV-4) ou souffler des fibres discontinues appelées « Verranne » (fig. IV-5). Les creusets sont chauffés électriquement par effet Joule. *Les filières ont des diamètres de 1 à 2 mm.* Dans le premier cas, les fibres étirées mécaniquement sont enroulées sur une broche donnant des vitesses d'étirage de 55

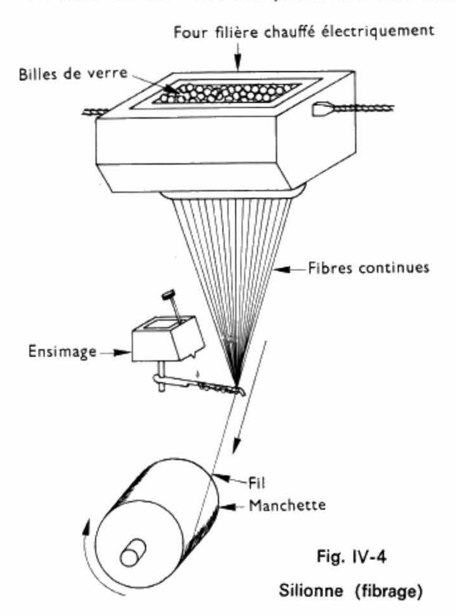


Fig. IV-4

Silionne (fibrage)

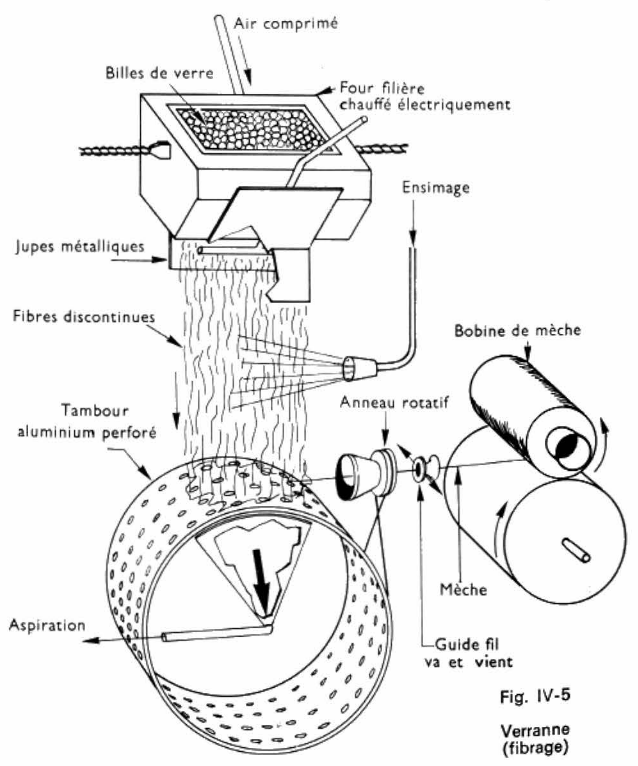
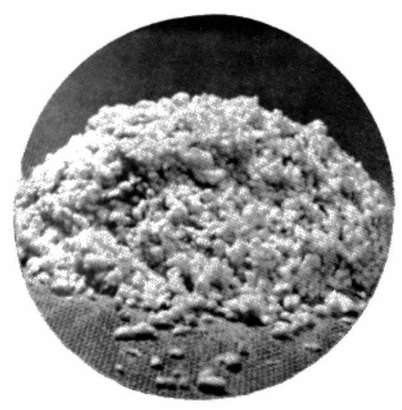


Fig. IV-5

Verranne (fibrage)



Fibres de verre broyées (*Pierre Beaune-SVT*)



Fils de verre coupés (*Pierre Beaune-SVT*)

à 60 m/s. La fibre obtenue a un diamètre compris entre 5 et 13 µm ; il est fonction du diamètre de la filière (on a pu atteindre 2,5 µm). La verranne est soufflée par jet d'air en fibres discontinues de longueur comprise entre 50 et 750 mm et de diamètre compris entre 5 et 10 µm. Les fibres aspirées sur un tambour percé de trous sont tordues et enroulées. Dans les deux cas, les fibres subissent un traitement facilitant les opérations de tissage ; ce traitement les revêt d'une pellicule lubrifiante et s'appelle « ensimage ». On fait quelquefois un ensimage plastique permettant l'accrochage des résines. Ces fibres de verre sont introduites dans les matières plastiques liquides pour réaliser des stratifiés ou des prémix (polyester, éthoxylines, formophénoliques) et on les introduit maintenant dans la plupart des matières thermoplastiques : polyamides 6-6 et 11, polycarbonate, polystyrène, etc. Ces fibres courtes augmentent de façon notable la résistance à la rupture en traction et au cisaillement.

Roving. — Ces fibres de verre sont commercialisées en mèches de « roving » constituées par 8, 15, 30, 60 fils silionne de 204 filaments bobinés sans torsion. Ces mèches sont utilisées, comme nous l'avons vu, pour faire du bobinage et alimentent des coupeurs de fibres qui fabriquent des fibres courtes.

Tableau I

Filaments	Point de ramollissement (degrés Celsius)	Point de fusion (degrés Celsius)	Masse volumique (grammes par centimètre cube)	Résistance en traction (décanewtons par millimètre carré)	Module de Young (décanewtons par millimètre carré)	Diamètre (micromètres)
I. Filaments continus						
Verre						
Verre E	379	700	2,55	351,5	7 350	10
Verre S	445	840	2,50	457	8 800	10
SiO_2	920	1 660	2,19	598	7 350	35
Polycristaux						
Al_2O_3	1 115	2 030	3,15	210	17 500	—
$Zr\ O_2$	1 470	2 750	4,84	210	35 000	—
Carbone	2 010	3 760	1,50	246	21 000	5
BN	1 640	2 990	1,90	140	9 100	7
Multiphase						
B	1 260	2 300	2,36	281	38 600	115
B_4C	1 340	2 450	2,36	232	49 200	—
SiC	1 640	2 790	4,09	210	49 200	76
TiB_2	—	—	4,48	105	52 000	—
Métaux						
W	1 870	3 400	19,4	408	41 400	13
Mo	1 440	2 620	10,2	225	36 500	25
René 41	730	1 350	8,26	204	16 800	25
Acier	760	1 380	7,74	421	20 000	13
Be	690	1 280	1,83	130	24 600	127
II. Filaments discontinus (whiskers)						
Céramique						
Al_2O_3	1 115	2 040	3,96	2 110	43 500	3-10
BeO	1 410	2 570	2,85	1 335	35 100	10-30
B_4C	1 340	2 450	2,52	1 400	49 200	—
SiC	1 470	2 790	3,18	2 100	49 200	1-3
Si_2N_4	1 050	1 890	3,18	1 400	38 600	—
Graphite	2 010	3 760	1,66	2 000	71 400	—
Métaux						
Cr	1 030	1 870	7,20	910	22 600	—
Cu	590	1 080	8,92	300	12 600	—
Fe	840	1 540	7,83	1 335	20 300	—
Ni	790	1 470	8,88	390	22 000	—

— *Autres fibres*. Les efforts ont plutôt porté sur la recherche d'autres fibres spéciales justifiées par des applications de pointes, aérospatiales ou militaires. On utilise en particulier *les fibres de verre lavées*, résultant d'un chauffage à 1 000 °C, suivi d'une attaque par acide concentré chaud qui laisse seulement un squelette siliceux fragile, mais supportant des températures voisines de 1 000 °C.

On fabrique également des fibres de silice à partir du cristal de roche ou des fibres de quartz ; on commence aussi à faire appel à des fibres de graphite, de carbure de silicium, d'oxyde de beryllium, de bore ou de saphir se présentant sous forme (continue ou discontinue) de « barbes » ou de trichytes appelées « whiskers » aux États-Unis d'Amérique. Ces produits ont des caractéristiques telles (ténacité $2{,}1 . 10^3$ daN/mm³) que l'on envisage de les utiliser de préférence avec une matrice métallique plutôt qu'avec une matrice synthétique organique.

Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau I de la page précédente.

3° *Intérêt des charges fibreuses*. — Les charges fibreuses s'étendent donc des fibres courtes ou très courtes introduites dans les prémix ou les thermoplastiques jusqu'aux fibres à haute résistance, continues, parallèles, utilisées dans le bobinage de filaments. On donne rarement aux fibres longues la désignation de « charges » mais plutôt celle de produits de renforcement.

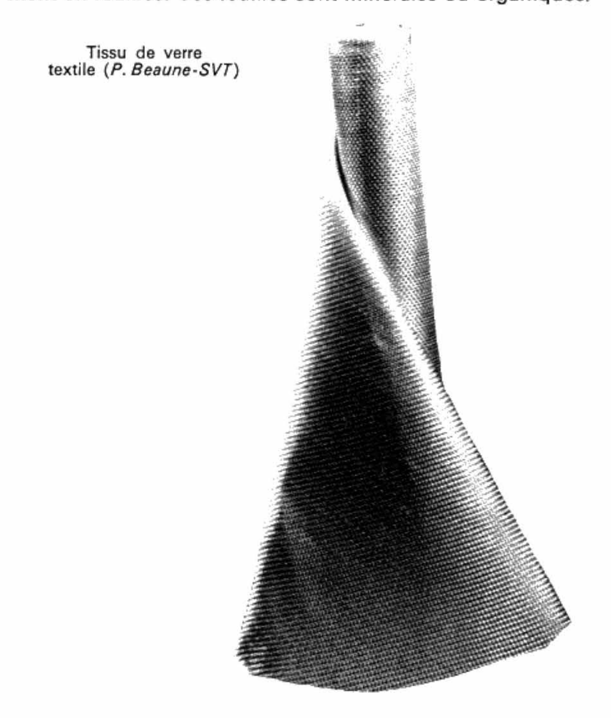
La résine agit comme une *matrice* de liaison pour apporter la forme, la rigidité transversale, les forces liant les fibres entre elles, la continuité entre les couches de fibres et la protection des fibres. Le fait que ces fibres soient monodimensionnelles introduit les conséquences suivantes :

a) Le renforcement est surtout apporté dans une direction parallèle à celle de la fibre. Dans une direction perpendiculaire, les choses sont inchangées ou peuvent être agravées par abaissement de la contrainte et de l'allongement à la rupture.

b) La deuxième conséquence réside dans l'utilisation idéale que l'on peut faire des renforcements fibreux et qui consiste à les *répartir de façon à ce qu'ils soient dirigés suivant le sens des contraintes maximales de tension.*

c) De plus, on peut obtenir une résine chargée et macroscopiquement isotrope en répartissant la fibre de façon aléatoire.

1.4.3. Produits de renforcement en feuilles. — Pour la réalisation de stratifiés basse pression ou haute pression on utilise couramment des produits de renforcement en feuilles. Ces feuilles sont minérales ou organiques.


Tissu de verre textile (*P. Beaune-SVT*)

1° *Minérales*. — Tous les produits fibreux sont utilisés ; le plus courant est la fibre de verre que l'on trouve sous forme de couches bobinées ou sous forme de mats, de voiles, de tissus. La nature du renfort a une importance primordiale en ce qui concerne les caractéristiques du produit final et régit, en particulier, son anisotropie.

a) *Fibre bobinée*. — Avec du polyester par exemple, la résistance à la rupture en traction σ_R peut atteindre 1 000 à 1 500 N/mm² dans le sens des fibres, et 20 à 50 N/mm² transversalement.

b) *Tissus haut module*. — C'est un produit sans trame dans lequel les fils sont les plus rectilignes possible : la résistance à la traction σ_R atteint 700 N/mm² et 125 N/mm² suivant les deux axes principaux d'orthotropie.

c) *Tissus de verre*. — Pratiquement tous les types de tissage sont utilisés ; on trouve en particulier des taffetas, des serges, des satins.

Les produits tissés avec des fibres ensimées doivent subir un désensimage chimique ou thermique ou les deux. Les tissus subissent ensuite un traitement de surface, permettant l'accrochage des résines ; ce traitement est appelé « finish ». Les fibres utilisées sont soit de la silionne, soit de la verranne. On choisit les types de tissus (tissage et fibres) en fonction de ce que l'on veut en faire :

— tissus de roving pour de hautes résistances ;

— tissus de verranne pour augmenter le pourcentage de résine ;

— satins déformables pour des formes profondes non développables. Certains satins dits *monstrueux* ont des flottés très larges.

d) *Mat de verre*. — C'est un feutre de fibres coupées ; il conduit à des stratifiés isotropes (150 N/mm²). Les masses des mats sont égales à 300, 450 ou 600 g/m².

e) *Voile de verre*. — C'est une sorte de mat de quelques grammes par mètre carré, destiné à améliorer l'état de surface.

f) *Divers*. — On utilise aussi les fibres tissées sous forme de rubans, de tresses, de jersey (tissus à maille), etc. La résistance σ_R des produits qu'ils permettent de fabriquer divisée par la masse volumique ρ de ceux-ci, conduit à des résultats qui montrent bien l'intérêt des tissus ou mats de fibres de verre comme produits de renforcement.

Matériaux	σ_R/ρ	
Stratifiés	9 à 40	daN/mm² par g/cm³
Acier	6 à 12	
Duralumin	10 à 15	

Des tissus de carbone sont obtenus par carbonisation de tissus de coton ou de tissus synthétiques en atmosphère réductrice.

On trouve aussi des tissus d'amiante, de quartz, de silice, etc. Tous ces tissus minéraux sont employés pour fabriquer des stratifiés « basse pression » avec des résines formophénoliques, polyester, éthoxyline et des stratifiés « haute pression » avec des résines formophénoliques, aminoplastes, silicones, etc.

2° *Organiques*

a) *Produits en feuilles non tissés*

— *Bois déroulé*. Le bois en feuille mince d'épaisseur comprise entre 0,5 et 1 mm est utilisé pour réaliser des stratifiés ; d'une couche à l'autre, on alterne le sens de la fibre.

— *Papier kraft*. Le papier est utilisé comme le bois, après imprégnation de résine formophénolique, pour faire des stratifiés qui sont décorés ou non avec une couche de papier colorée et imprégnée de mélamine (lamifiés).

b) *Tissus*. — Des tissus de jute, de coton, de nylon, de polypropylène, de polyéthylène téréphtalate sont employés avec certains des films précédents pour fabriquer des complexes ou sont utilisés pour réaliser des stratifiés à usages divers.

3° *Produits de remplissage*. — On peut réaliser des sandwiches avec des produits de remplissage qui sont :

a) des nids d'abeilles ;

b) des produits expansés.

1.4.4. Normalisation. — Le règlement de la marque de qualité des résines thermodurcissables a entraîné un début de normalisation des désignations, qui a été résumé dans le tableau II.

Tableau II

Nature de la charge et chiffres repères correspondants	Forme de la charge et chiffres repères			
	Poudre ou flocons $l \leqslant 5$ mm (1)	Éléments fragmentaires ou fibres courtes $l > 5$ mm (2)	Éléments stratifiés sans trame (3)	Éléments stratifiés avec trame (4)
Minéraux (amiante, ardoise, mica) . (1)	P 11	P 12	P 13	P 14 Am 14
Bois . . . . (2)	P 21	P 22	P 23	
Cellulose, papier et autres produits organiques non spécifiés . . . . (3)	P 31 Am 31	P 32	P 33 Am 33	
Textiles . . . . . . (4)	P 41	P 42		P 44 Am 44

1.5. Adjuvants divers. — Un certain nombre d'autres adjuvants sont couramment employés avec plus ou moins de succès. Citons :

— *Les fongicides*, tels que les sels de cuivre et de mercure, en particulier le naphténate.

— *Les antistatiques* superficiels ou internes destinés, en général, non pas à empêcher le matériau de se charger mais à accélérer sa décharge ; leur importance est grande, aussi bien pour des raisons commerciales et esthétiques que pour des raisons de sécurité.

— *Les ignifuges* dont nous avons déjà parlé et certains pigments phosphorescents, ou fluorescents : il existe des pigments fluorescents dans l'ultraviolet, d'autres dans l'infrarouge, après excitation dans l'ultraviolet. De plus, il existe des pigments photosensibles, dont la structure chimique est modifiée et qui deviennent opaques dans le visible après avoir été transparents.

2. MONOGRAPHIE

2.1. Thermodurcissables

2.1.1. Les formophénoliques, encore appelés phénoplastes, sont obtenus par polycondensation du formaldéhyde et d'un phénol.

1° *Préparation.* — La réaction peut se produire avec le phénol ordinaire trifonctionnel ou un phénol substitué bifonctionnel comme le crésol ; dans le premier cas la réaction est différente suivant le pH, le type de catalyseur utilisé et les proportions des constituants.

Avec un excès de formol et en milieu alcalin, on aboutit aux produits ci-après en passant par des étapes intermédiaires : liquides pâteux, solides fusibles, solides infusibles et insolubles (*A, B, C* ou résol, résitol, résite). Les sociétés productrices des phénoplastes les vendent à l'état *A*.

En milieu acide et avec un excès de phénol on aboutit à des polycondensats linéaires de masse moléculaire faible (< 1000) qui peuvent être réticulés au cours du moulage grâce à l'hexaméthylènetétramine.

Industriellement, on opère dans des grignards de 2 000 à 20 000 litres en inox ou en acier émaillé.

2° *Renseignements économiques.* — On trouve les résines formophénoliques sous forme de produits à couler, de poudres à mouler, de stratifiés, de colles et de produits expansés.

— *Résines coulables.* Très peu utilisées, elles sont rares.

— *Stratifiés : papier ou carton.* Ce sont les « lamifiés ». Malgré la concurrence étrangère, la production française de stratifiés décoratifs est de plusieurs millions de mètres carrés.

Historiquement, les stratifiés décoratifs ont succédé aux stratifiés industriels lancés par une société américaine pour remplacer le mica. Deux ingénieurs américains, O'Connor et Herbert Faber, ont mis au point les stratifiés décoratifs par adjonction d'une couche décorée en surface.

— *Stratifiés industriels* sont renforcés par des tissus de coton, des tissus de verre ou du bois déroulé ; on fabrique aussi (en électronique) des stratifiés complexes : papier bakélisé — feuille de cuivre.

	Produits et mouvements	Tonnes par an
Production française (en 1972) de phénoplastes	*Poudres à mouler*	
	Production	25 000
	Importations	4 000
	Exportations	3 000
	Consommation	26 000
	Produits divers	
	Production	36 000
	Importations	11 000
	Exportations	8 000
	Consommation approximative	39 000
Production américaine de phénoplastes	*Poudres à mouler*	120 000
	Produits divers	280 000

Dans le premier cas, la masse pour les poudres à mouler correspond à la résine chargée.

3° *Propriétés physiques.* — Les résines formophénoliques sont de couleur sombre, transparentes ou opaques. La masse volumique de la résine seule est voisine de 1,30 g/cm^3 ; elle peut atteindre 2 g/cm^3 dans les produits chargés et peut descendre en dessous de 0,02 g/cm^3 pour les produits expansés.

Caractéristiques mécaniques. — Nous avons déjà donné les caractéristiques générales des composés macromoléculaires tridimensionnels (V. chap. 2) ; nous indiquerons donc simplement des caractéristiques particulières des semi-produits, en fonction de leur forme industrielle. Nous limiterons volontairement les caractéristiques mécaniques, qui ne sont données qu'à titre indicatif (V. tableau, page 414).

Les allongements de rupture en traction sont inférieurs à 1 % ; ils sont compris entre 0,1 et 0,5 % pour la P 11 mica.

Les produits expansés ont généralement des caractéristiques mécaniques médiocres : ils s'effritent facilement.

La tenue à la chaleur des résines formophénoliques est bonne ; leur température limite de résistance à la chaleur en exploitation continue est voisine de 150 °C et peut atteindre 250 °C pour certaines P 11 amiante.

Caractéristiques mécaniques

Caractéristiques	Résines coulées	Poudres à mouler		Stratifiés		
		P 21	P 11 mica	Tissus de coton	Tissus de verre	Bois
ρ (1)	1,32	1,4 à 1,45	1,8	1,35 à 1,4	1,4 à 1,8	1,3 à 1,4
E (2)	100 à 250	700 à 800	1 000 à 2 000	300 à 1 000	700 à 1 400	2 600
σ_T (2)	2 à 4	2,5 à 5	1,5 à 5	4,5 à 14	8 à 28	11 à 22
σ_c (2)	6 à 20	20 à 25	12 à 18	15 à 28	29 à 33	15 à 22
$\lambda 10^{-5}$ (3)	8	3 à 5	1,5 à 3	1,8 à 3		0,6 à 6,5

(1) grammes par centimètre cube; (2) décanewtons par millimètre carré; (3) degrés Celsius à la puissance moins 1.

Pourcentage d'eau absorbée en 24 heures par des formophénoliques de 3 mm d'épaisseur

Résine coulée	P 21	P 11 mica	P 11 amiante	P 42	Stratifié coton	Stratifié bois	Stratifié tissu de verre
0,1 à 0,2 %	0,3 à 1 %	0,01 à 0,07 %	0,1 à 0,3 %	0,5 à 1,7 %	0,3 à 9 %	2,5 à 11 %	0,3 à 2,5 %

Caractéristiques chimiques. — Ils résistent bien aux solvants organiques et mal aux acides et aux bases fortes. Ils sont peu inflammables. L'absorption d'eau dépend étroitement de la charge comme l'indique le tableau précédent.

Caractéristiques électriques. — Ces matériaux sont de bons isolants électriques; leur tension de claquage est voisine de 15 kV/mm pour une plaque de 3 mm d'épaisseur. Leur résistance à l'arc est mauvaise. Leur angle de pertes étant grand, ils constituent de mauvais isolants en haute fréquence.

4° *Mise en œuvre*

a) *Coulée.* — Les résines coulables sont des résols solides ou en solution alcoolique et des novolaques solides. On catalyse en général à l'aide d'acide chlorhydrique. Le durcissement et le refroidissement doivent être lents, si l'on veut éviter les craquelures et les tensions internes. Le peu d'intérêt que la coulée des phénoplastes pouvait présenter a disparu depuis la commercialisation des polyesters et des époxy.

b) *Poudres à mouler.* — On trouve des produits du type P 21, P 11 P 41, P 42, les P 11 étant chargées de mica, d'amiante ou d'ardoise. Ces produits sont vendus en poudre fine.

Préparation des poudres à mouler. — Les résines employées sont en général des novolaques contenant souvent un peu de crésol; elles sont broyées, mélangées aux charges et passées sur un mélangeur à cylindre. Le crêpe obtenu est broyé et tamisé. La poudre commercialisée contient en plus de l'hexaméthylène-tétramine, du stéarate (lubrifiant), des colorants, etc. Ces poudres sont ensuite moulées par compression, transfert et injection (V. chap. 3).

c) *Colles.* — Les colles formophénoliques sont encore très employées pour faire des collages métal-métal ou métal-bois - matière formophénolique.

Ce sont des résines solides pulvérulentes, contenant des catalyseurs ou des résines mises en solution. On les étale sur les surfaces à coller et dans ce dernier cas, on évapore le solvant. On chauffe les pièces à assembler à une température comprise entre 170 et 200 °C et on les presse l'une contre l'autre (10 à 20 daN/cm²).

Certaines colles sont employées sur un support bon marché, ce qui permet le découpage des surfaces de collage à l'aide d'un « patron » et une industrialisation du procédé.

Les colles à froid exigent toujours l'emploi d'un durcisseur généralement acide.

d) *Produits expansés.* — Les produits expansés sont obtenus à partir d'une résine liquide que l'on expanse en la battant, ou par tout autre moyen, et que l'on catalyse dans un moule pour la durcir. L'expansion est favorisée alors par l'introduction d'un agent mouillant.

5° *Méthodes de contrôle particulières.* — Un certain nombre de méthodes de contrôle particulières ont été mises au point et éventuellement normalisées. Elles concernent:

a) *Poudres à mouler.* — Mesure de la masse volumique apparente ρ_0 des matières à mouler (NF T 51-003)

— *Facteur de contraction* (NF T 51-012) :

$F = \frac{\rho_0}{\rho}$, ρ étant masse volumique de la matière moulée.

On l'appelle encore foisonnement.

— *Dosage de phénols libres* (NF T 51-010) :

Objet :

— Vérifier la cuisson.

— Apprécier les risques d'altération des produits alimentaires.

Principe : Broyer, extraire à l'eau bouillante les phénols libres et les doser.

— *Dosage de l'ammoniac libre et des composés ammoniacaux* (NF T 51-009) :

Objet : Apprécier les risques d'altération des produits alimentaires et de corrosion des prisonniers.

Principe : Extraction dosage.

— *Mesure de l'extrait acétonique* (NF T 51-004) :

Objet : Apprécier l'état relatif de la polycondensation.

Principe : Extraction de l'acétone (dans un Soxhlet ou un Kumagawa) des produits non polycondensés.

Cette méthode a seulement une valeur relative car on dissout aussi les lubrifiants, les colorants et les plastifiants.

— *Mesure de la dureté des poudres.* On appelle dureté des poudres thermodurcissables, l'inverse de la fluidité. On dit qu'une poudre est « dure » quand elle s'écoule mal, « tendre » quand elle est fluide. Un certain nombre de méthodes ont été utilisées pour mesurer cette caractéristique.

Marque de qualité. — Une marque de qualité a été créée pendant la deuxième guerre mondiale; elle est gérée par le Centre d'études des matières plastiques.

Le contrôle est fait sur objet-type. Les essais habituels sont:

— dynstat (essais de choc) ;
— déformation à chaud ;
— essai de combustibilité Schramm ;
— résistivité transversale et superficielle, etc.

b) *Stratifiés à surface décorée* (NFT 54 001). — Désignation des lamifiés:

— marque commerciale ;
— $L \times l$ (en centimètres) — e (en millimètres) ;
— RC (résistance aux cigarettes) ;
— référence à la norme; exemple: Polyrey 305 × 122 — 1,5 — RC — NF T 54-001.

Les spécifications prévoient en particulier :
— résistance à la rayure ;
— résistance à l'abrasion ;
— épaisseurs et tolérances ;
— stabilité dimensionnelle ;
— comportement dans l'eau bouillante ;
— résistance thermique ;
— résistance aux produits domestiques ;
— tenue à une lampe au xénon ;
— résistance au choc ;
— résistance aux cigarettes.

c) *Produits expansés*
— compression (NF T 56-101).
— flexion (NF T 56-102).
— traction (NF T 56-103).
— poinçonnage (NF T 56-104).

6° *Applications.* — Pièces électrotechniques moulées, composants électroniques, surmoulages, pièces techniques, éléments de filtres presses, poignées, boîtiers. Les stratifiés sont utilisés en électrotechnique ; les colles dans l'aéronautique.

2.1.2. Les aminoplastes. — On appelle aminoplastes, les résines urée-formol ou mélamine-formol.

1° *Préparation.* — La réaction de polycondensation est du même type que pour les phénoplastes :

$$O = C\begin{matrix} NH_2 \\ NH_2 \end{matrix} + 3\,HO - CH_2 - OH \longrightarrow$$

$$O = C\begin{matrix} N\begin{matrix} CH_2\,OH \\ CH_2\,OH \end{matrix} \\ NH\;CH_2\,OH \end{matrix}$$

(en pratique l'urée est trifonctionnelle). La polycondensation se poursuit entre les molécules identiques.

La mélamine hexafonctionnelle conduit à des réactions du même type ;

$$C_3N_3(NH_2)_3 + 6[HO{-}CH_2{-}OH] \rightarrow C_3N_3[N(CH_2OH)_2]_3$$

2° *Renseignements économiques.* — Les principales applications des aminoplastes correspondent à des poudres à mouler, à des résines pour colles, à des vernis et à des stratifiés (tous les stratifiés décoratifs pour la couche superficielle) ; les produits expansés sont plus rares.

	Produits et mouvements	Tonnes par an
Production française d'aminoplastes (en 1972)	*Poudres à mouler*	
	Production	500
	Importation	8 000
	Exportation	100
	Consommation	8 400
	Liants et vernis	
	Production	155 000
	Importation	50 000
	Exportation	50 000
	Consommation	155 000

3° *Propriétés*

a) *Physiques et mécaniques.* — Les aminoplastes ont une masse volumique comprise entre 1,40 et 1,50 g/cm³ ; ce sont des résines claires, incolores, transparentes, inodores ; les poudres à mouler comportent en général des charges diverses, en particulier de linters de coton ; les objets moulés peuvent être de teintes claires.

Mécaniquement, ce sont des produits qui, avec des charges cellulosiques (Au 21 ou Am 21) possèdent des modules d'élasticité compris entre 700 et 1 000 daN/mm² et des allongements à la rupture en traction inférieurs à 1 %. Les Am 21 et les vernis à base de mélamine-formol présentent une grande dureté superficielle.

b) *Propriétés électriques.* — Les aminoplastes possèdent d'excellentes qualités d'isolation électrique, en particulier les résines mélamine-formol. La tension de claquage instantanée des Au 21 et Am 21 est voisine de 15 kV/mm (pour 3 mm d'épaisseur).

c) *Propriétés chimiques.* — La résistance chimique est bonne contre les bases ou les acides faibles et les solvants organiques ; elle est moins bonne contre les bases et les acides forts.

L'absorption d'eau est de 0,6 % en 24 heures par 3 mm d'épaisseur, dans le cas des Au 21 et comprise entre 0,3 et 0,5 % pour l'Am 21.

Les aminoplastes résistent à des températures comprises entre 60 °C et 100 °C en régime continu mais ce comportement peut être considérablement amélioré par des charges minérales. Leur inflammabilité est pratiquement nulle.

4° *Méthodes de mise en œuvre.* — Sous forme de poudre, les aminoplastes sont mis en œuvre par toutes les méthodes habituelles de moulage des thermodurcissables : compression, transfert et injection (depuis peu de temps). Ils servent aussi à la fabrication de stratifiés haute pression. Ils sont également utilisés sous forme de vernis et de colles.

Compression. — Il faut noter que la nécessité d'un dégazage est impérative avec les aminoplastes, au début du moulage. Les températures de moulage sont plus basses que dans le cas des phénoplastes. Avec les résines urée-formol les moules doivent être chromés.

5° *Méthodes de contrôle particulières*

Normalisation. — La plupart des essais mécaniques et électriques déjà vus sont couramment employés pour contrôler les objets en aminoplastes.

Les résines urée-formol, contrairement aux résines mélamine-formol, ne font pas actuellement partie des produits admis à la marque de qualité PF des matières thermodurcissables.

6° *Applications.* — Les résines mélamine-formol sont actuellement les matières plastiques les plus dures ; cela justifie, avec leur transparence, le développement actuel des stratifiés décoratifs.

Les aminoplastes servent surtout au moulage de matériel électroménager (bols de centrifugeurs, carters de mixeurs, corps de rasoirs électriques). Ils servent également de vernis à planchers et de colles à bois.

La vaisselle de collectivités ou de pique-nique, est souvent en mélamine-formol.

2.1.3. Les polyesters. — Les produits étudiés ici sont les polyesters insaturés réticulables, le plus souvent par le styrène. Nous dirons aussi quelques mots des résines « glyptals » qui sont des polyesters tridimensionnels, surtout utilisés pour la fabrication des peintures.

1° *Préparation.* — Les polyesters sont des polycondensats insaturés, liquides, obtenus par estérification, et réticulés en présence de catalyseurs.

Les polyesters liquides sont préparés à partir d'un ou plusieurs dialcools et d'un ou plusieurs diacides. C'est le cas, par exemple, du polymaléate polyphtalate de propylène glycol, fabriqué à partir :

de l'acide phtalique : $HOOC - C_6H_4 - COOH$

de l'acide maléïque : $HOOC - CH = CH - COOH$

du propylène glycol : $HO - CH_2 - CHCH_3 - OH$

$$-O_2C - CH = CH - CO_2 - CH_2 - CHCH_3 - O_2C - C_6H_4 - CO_2 - CH_2 - CHCH_3 - O_2C -$$

La réticulation des polyesters linéaires s'opère grâce à l'ouverture des doubles liaisons ; la copolymérisation peut se faire avec du méthacrylate de méthyle, avec du phtalate de diallyle ou du cyanurate de triallyle ; toutefois, le styrène est le plus couramment employé.

L'utilisation d'un catalyseur provoque l'ouverture des doubles liaisons des polyesters et du monomère et permet la réticulation. Cette réaction débute sous l'action de la chaleur ou d'un accélérateur, suivant le schéma ci-après. La double liaison représentée est celle de l'acide ou de l'anhydride maléique.

$$— O_2C — CH = CH — CO_2 \ldots$$
$$C_6H_5 — CH = CH_2$$
$$— O_2C — CH = CH — CO_2 \ldots$$

$$— O_2C — CH — CH — CO_2 \ldots$$
$$C_6H_5 — CH — CH_2$$
$$— O_2C — CH — CH — CO_2 \ldots$$

L'indice de réseau dépendra donc de la distance entre les doubles liaisons, en changeant le dialcool ou en utilisant des proportions variables d'acides non réactifs (saturés) comme l'acide adipique ou l'acide phtalique.

Plus les distances sont grandes, plus l'indice de réseau est faible et plus le polyester est souple.

Les catalyseurs ou promoteurs les plus courants sont les peroxydes :

— de benzoyle

$$C_6H_5 — \underset{\underset{O}{\|}}{C} — O — O — \underset{\underset{O}{\|}}{C} — C_6H_5$$

— de lauryle ;
— de butyle tertiaire ;
— de méthyl éthyl cétone.

La réaction se produit entre 0 °C et + 120 °C ou à la température ambiante en présence d'un accélérateur.

Les accélérateurs sont le plus souvent des sels organiques de cobalt : naphténate ou octoate de cobalt mais peuvent être également la diméthylaniline, le diéthylaniline, le diméthyl-toluidine et le lauryl-mercaptan.

Le durcissement des résines polyesters s'opère en deux temps :

a) *Le temps de gel.* — La résine se transforme en une gelée souple, en dégageant une faible quantité de chaleur. C'est pendant ce temps que la résine et ses produits de renforcement peuvent être mis en forme (par suite, la connaissance du temps de gel est très importante). On peut abréger cette première phase, en augmentant le pourcentage d'accélérateur ou la température de la résine ; dans ce dernier cas, la viscosité de la résine diminue et on court le risque de la voir couler sur les surfaces verticales.

b) *Le temps de durcissement* (fig. IV-6). — Il débute lorsque le gel ne peut plus être mis en forme et, en même temps, on peut observer que la réaction devient de plus en plus exothermique ; la réaction de durcissement se poursuit pendant une période où la température décroît. Il est évident que la courbe température-temps est étroitement liée aux échanges thermiques avec l'extérieur. Des masses importantes de polyesters doivent être catalysées et accélérées avec prudence, faute de quoi on risque de provoquer des échauffements inadmissibles qui entraînent un craquellement de l'ensemble et même son auto-inflammation. On conseille habituellement de terminer la réticulation par un post-étuvage à 50-60 °C pendant un minimum de 10 h. *Le mélange direct des catalyseurs et accélérateurs conduit à une réaction explosive.* Une solution qui trouve des applications intéressantes, en particulier dans la projection des polyesters, consiste à partager la résine en deux parties, à catalyser une moitié et à ajouter l'accélérateur à l'autre ; on mélange au moment de l'emploi.

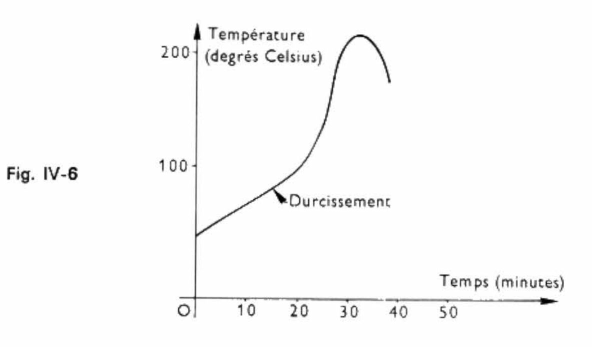


Fig. IV-6

D'une façon générale, la réactivité de la résine, caractérisée par la température de pointe et la pente de la courbe dépendra de la formule de la résine (polyester et monomère), du catalyseur, de l'accélérateur et de la température.

Les polyesters tridimensionnels résultent de la polycondensation de polyalcools et de polyacides, dont l'un au moins a une fonctionnalité supérieure à 2 ; on les connaît généralement sous le nom de *résines glyptals* ou glycérophtaliques, de façon à rappeler leur origine la plus fréquente (glycérol + anhydride phtalique).

Le glycérol $OHCH_2 — CHOH — CH_2OH$, permet la réaction d'estérification sur les trois radicaux OH :

$$O_2C — C_6H_4 — CO_2 — CH_2 — \underset{\underset{\underset{\underset{C_6H_4}{|}}{C}}{O_2}}{CH} — CH_2 — O_2C — C_6H_4 — CO_2$$

$$\underset{\underset{\underset{|}{O_2}}{|}}{C}$$
$$— CH_2 — CH — CH_2 —$$

Ce sont des masses transparentes et fragiles, moins employées maintenant. En revanche, on emploie les oléo-glycérophtaliques dans les peintures et vernis.

2° *Informations économiques.* — Les résines polyesters sont commercialisées sous forme de résines liquides ou de premix et de semiproduits, plaques planes ou ondulées, tubes, etc. On les met en œuvre par moulage, par coulée, etc.

	Produits et mouvements	Tonnes par an
	Produits divers	
Production française de polyesters (en 1972)	Production	60 000
	Importation	9 000
	Exportation	12 000
	Consommation	57 000

45 % de la production des plastiques renforcés de fibre de verre correspond à des plaques de couverture, soit 7.10^6 m² par an (production doublée en cinq ans).

3° *Propriétés*

a) *Physiques.* — Rarement employées seules, les résines polyesters coulées ont une masse volumique comprise entre 1,10 et 1,20 g/cm³ ; elles sont claires et transparentes et peuvent être obtenues parfaitement limpides si l'on recherche certaines applications telles que l'enrobage. L'indice de réfraction à 20 °C est voisin de celui du verre. Le coefficient de dilatation linéaire est proche de 9.10^{-5} °C^{-1}. L'absorption d'eau est comprise entre 0,2 et 0,4 % et leur retrait atteint 6 à 10 %.

b) *Mécaniques.* — Nous avons vu que la résistance en traction pouvait varier considérablement avec le renfort : de 2,4 à 7 daN/mm², elle passe à des valeurs pouvant dépasser 100 daN/mm² avec de la fibre unidirectionnelle. Le module d'élasticité compris entre 250 et 350 daN/mm² peut dépasser 1 500 daN/mm².

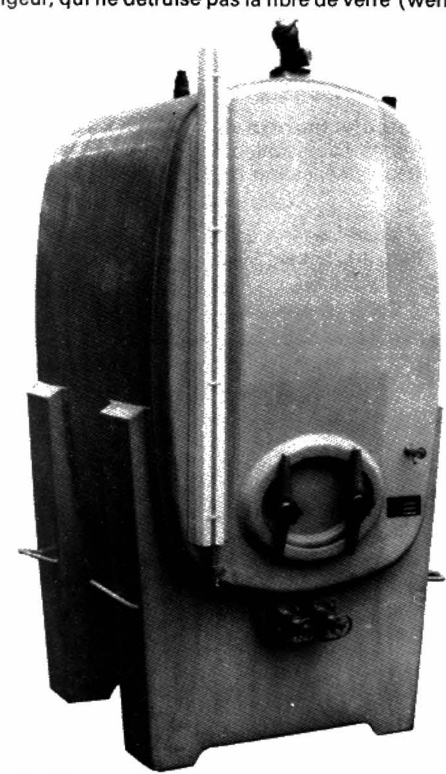
c) *Électriques.* — La tension de claquage instantanée pour une épaisseur de 3 mm est voisine de 15 kV/mm pour la résine pure. La présence de tissus de verre la fait diminuer à environ 6 kV/mm.

d) *Chimiques.* — Elles sont inflammables mais la plupart des producteurs mettent sur le marché des résines auto-extinguibles. La résistance à la chaleur en exposition continue est bonne mais fibres et résines sont partiellement hydrolysables.

4° *Méthodes de mise en œuvre.* — Ces résines sont surtout destinées au moulage de grandes surfaces, à l'aide d'un certain nombre de techniques que nous avons vues en détail au chapitre 3. Par ailleurs, on peut les mouler sous forme de compounds ou prémix et on peut les couler.

a) *Compounds ou prémix.* — Les compounds ou prémix peuvent être utilisés pour la fabrication industrielle de pièces. On appelle compound le mélange de résines polyesters (20 à 40 parties), de catalyseur (1-2 parties), d'une charge minérale (30 à 50 parties), de fibre coupée (20 à 30 parties), d'un lubrifiant interne (ortholéum) et d'un colorant.

Le mélange est fait dans un mélangeur werner et le résultat correspond à une pâte, qui doit être conservée en chambre froide. Les prémix peuvent être moulés par compression à 120 °C-130 °C avec des pressions faibles et des temps de cuisson courts. Des prémix, dont la composition ne correspond pas à la formule, collent au moule ; pour nettoyer ce dernier, il suffit de mouler dans le même moule quelques objets en urée-formol. On peut également les mouler par transfert. Les charges utilisées dans les prémix sont nécessaires pour augmenter suffisamment la viscosité apparente de la résine afin qu'elle véhicule bien la fibre de verre. Les charges employées sont surtout le carbonate de calcium, la micro-amiante, la silice, la bentonite. Ces charges, en quantité importante, abaissent considérablement le prix des prémix. Le mélange doit être fait dans un mélangeur, qui ne détruise pas la fibre de verre (werner usé).



Cuve en stratifié verres-polyester pour stockage de produits alimentaires (*M. + H. — Plastrex-Manurhin*)

Les prémix sont employés pour la réalisation de pièces électrotechniques. Les qualités des pièces moulées sont en général beaucoup plus faibles que celles des stratifiés.

b) *Coulée.* — La coulée est utilisée pour la réalisation d'enrobage de fleurs, de coquillages, etc., dans un but décoratif. En général, la coulée se pratique en deux fois et on essaie, quelquefois, de réaliser une surface de séparation non plane.

5° *Méthodes de contrôle particulières. Normalisation.* — Un certain nombre de documents a été édité par la C.E.I. et la Marine Nationale, pour le contrôle des stratifiés polyesters. Des projets de norme AFNOR définissent, pour les plaques ondulées :

— les méthodes de contrôle dimensionnel : NF P 30-301 ;
— les essais de flexion : NF P 30-302 ;
— la mesure de dureté Barcol : NF P 38-501 ;
— le contrôle de la forme des objets par gabarits : NF P 38-504 ;
— etc.

Identification. — Ces résines brûlent avec une flamme fuligineuse et une forte odeur de styrène ; elles peuvent être ignifugées.

6° *Applications.* — Plaques ondulées, toiture, bardage, bateaux, bouées insubmersibles, radomes, éléments de fusée, ameublement, sports (perches, skis, skis nautiques, luges), crosses d'armes légères, gilets pare-balles, toits d'automobiles, pièces en prémix et pièces coulées.

2.1.4. Polyesters spéciaux. — Un certain nombre de polyesters spéciaux sont commercialisés ; il s'agit essentiellement des dérivés allyliques.

Le radical allyle est : $CH_2 = CH - CH_2 -$

1° *Préparation*

a) *Le phtalate de diallyle* est obtenu par estérification de l'alcool allylique par l'anhydride phtalique :

$$C_6H_4\begin{cases} COO\,CH_2 - CH = CH_2 \\ COO\,CH_2 - CH = CH_2 \end{cases}$$

Il peut polymériser de 80 °C à 100 °C, en présence de peroxyde de benzoyle. La polymérisation, lente, peut être arrêtée avant la formation d'une structure tridimensionnelle et poursuivie ensuite comme dans le cas des autres résines thermodurcissables.

b) *Le diéthylène glycol bis allylcarbonate :*

$$\left.\begin{array}{l} CH_2 = CH - CH_2 - O - \overset{\displaystyle O}{\overset{\|}{C}} - O - CH_2 - CH_2 \\ CH_2 = CH - CH_2 - O - \underset{\displaystyle O}{\underset{\|}{C}} - O - CH_2 - CH_2 \end{array}\right\rangle O$$

polymérise ou copolymérise avec le précédent.

c) *Le triallyl cyanurate* (2, 4, 6 trialloxy, 1, 3, 5 triazine). — Il copolymérise avec les monomères précédents. Par ailleurs, le phtalate de diallyle et le triallyl cyanurate sont employés à la place du styrène pour copolymériser avec des polyesters insaturés et réaliser des résines à couler, comme celles que nous avons étudiées précédemment.

$$\begin{array}{c} CH_2 - CH = CH_2 \\ | \\ O \\ | \\ C \\ N \diagup \quad \diagdown\!\!\diagdown N \\ \| \qquad\quad | \\ CH_2 = CH - CH_2O - C \diagdown \;\; N \;\; \diagup\!\!\diagup C - OCH_2 - CH = CH_2 \end{array}$$

2° *Renseignements économiques.* — Le diallylglycol carbonate sert actuellement à fabriquer par coulée, en France, trois millions de lentilles correctives et quatre millions de lentilles solaires.

3° *Propriétés physiques, mécaniques, chimiques, électriques.* — Masse volumique, résistance en traction et module d'élasticité sont voisins de ceux des autres polyesters.

Caractéristiques	Polyesters allyliques		Polyester triallylcyanurate non chargé	Diallyl phtalate	
	Coulés	Fibre de verre		Non chargé	Fibre de verre
Absorption d'eau en 24 h ($e = 3$ mm).	0,05 à 0,4 %	0,2 à 0,4 %	0,7 %	0,2 %	0,2 %
Résistance à la chaleur en exposition continue ...	100 °C	150 °C	200 °C	170 °C	200 °C

4° *Mise en œuvre.* — *Allyliques.* — Polymérisation sous forme de résines pour stratifiés ou de compounds. Le monomère commence à polymériser et donne des fluides visqueux ou des prépolymères solides auxquels on ajoute du monomère. On utilise ces prépolymères pour faire des stratifiés, des préimprégnés ou des compounds.

Carbonate de diallyl-glycol. — On les coule.

Cyanurate de triallyle. — Très cher; il est presque exclusivement employé avec des polyesters pour faire des stratifiés résistant à haute température.

5° *Normalisation.* — Les méthodes de contrôle des polyesters peuvent être appliquées.

6° *Applications.* — D'une façon générale, stratifiés et compounds ont des applications en électricité et à haute température. Le triallyle cyanurate remplaçant le styrène dans les polyesters, il permet de fabriquer des stratifiés qui possèdent des caractéristiques électriques constantes jusqu'à 250 °C, qui sont ignifugés et résistent à tous les solvants (ces stratifiés sont encore rigides à 250 °C). On en fait des verres de sécurité, des revêtements isolants pour câbles électriques, des vernis, des laques, etc.

2.1.5. Résines éthoxylines ou résines d'époxy ou époxydes

1° *Préparation.* — Elles sont obtenues par condensation de l'épichlorhydrine du glycol $CH_2 - CH - CH_2Cl$ (pont O entre les deux premiers carbones)

avec des diphénols $OH - R - OH$ et en particulier avec le dihydroxy-4-4'-diphényl-diméthyl-méthane ou diphénylol-propane

$$HO-C_6H_4-C(CH_3)_2-C_6H_4-OH$$

(appelé aussi bis-phénol A).

On fait réagir le diphénol et l'épichlorhydrine en milieu alcalin à 100 °C.

On obtient un produit du type :

$$\underset{\diagdown O \diagup}{CH_2 - CH} - CH_2 - [\,O - R - OCH_2 - \underset{OH}{CH} - CH_2]_n - O - R - OCH_2 - \underset{\diagdown O \diagup}{CH - CH_2}$$

Suivant la valeur de n, on passe de solides à bas point de fusion à des produits de points de fusion voisins de 150 °C ; la masse moléculaire atteint 7 000 pour $n \approx 20$.

À chaud ces résines peuvent être réticulées avec des anhydrides d'acide ou des amines aromatiques.

À froid, la réticulation peut être réalisée par des amines aliphatiques :

$$R\begin{cases} NH_2 + \underset{\diagdown O \diagup}{CH_2 - CH} - CH_2 \ldots \\ NH_2 + \underset{\diagdown O \diagup}{CH_2 - CH} - CH_2 \ldots \end{cases} \longrightarrow R\begin{cases} NH - CH_2 - CHOH - CH_2 \ldots \\ NH - CH_2 - CHOH - CH_2 \ldots \end{cases}$$

2° *Caractéristiques.* — Les propriétés mécaniques des stratifiés éthoxylines sont supérieures à celles des polyesters et les propriétés électriques légèrement inférieures. La fibre se mouille mieux et l'accrochage est meilleur. Jusqu'à 25 % de résine, le stratifié est opaque ; il devient vraiment transparent avec les résines claires à partir de 50 % de résine. Les résines d'époxy sont surtout d'excellentes colles ; la résistance du collage métal-métal est facilement de 2 daN/mm² ; elle peut atteindre 5 daN/mm². Les collages à froid sont moins résistants que les collages à chaud. Des peintures ou des vernis époxydes résistent aux solvants, sauf aux cétones, aux graisses, huiles, acides et bases minérales (concentrées ou non) et aux solutions détergentes, etc. Une tôle revêtue peut subir l'emboutissage sans craquelure. Un jet en bronze verni peut recevoir un coup de marteau qui le déforme sans fissuration.

3° *Mise en œuvre*

Coulée. On peut utiliser des moules en polyéthylène haute densité en aluminium ou en acier revêtu de PTFE.

Moulage de prémix. Par compression ou transfert.

Techniques des poudres. Pour le revêtement de pièces métalliques.

Vernis (en solution). Pour l'impression des bouteilles de verre, la protection interne des fûts et des boîtes de conserve.

Colles. Solides que l'on fond : poudres, pâtes liquides, solutions catalysées. Certaines colles sont vendues sous forme de mastic. Il faut prendre certaines précautions pour la mise en œuvre (dermatose).

4° *Méthodes de contrôle.* — Le texte AFNOR NF C 26-151, de janvier 1967, a pour titre « Isolants stratifiés à base de verre et de résine époxyde, en feuille ou en planche ». Il définit les catégories suivantes :

VEE 1 : Isolant pour applications électroniques à froid ;
VEE 2 : Isolant pour applications électroniques à chaud ;
VE M 1 : Isolant pour applications électriques et mécaniques à froid ;
VE M 2 : Isolant pour applications électriques à chaud.

6° *Applications.* — Colles pour de multiples usages, stratifiés à usage électrique, gabarits de contrôle de tôlerie en aviation et en automobile, aviation, industrie spatiale, « potting », peintures anticorrosion, revêtement de sol.

2.2. Thermoplastiques. Polymères amorphes

2.2.1. Le polychlorure de vinyle. — Le polychlorure de vinyle dont l'abréviation internationale est PVC, est obtenu par polymérisation du chlorure de vinyle :

$$CH_2 = CHCl$$

1° *Préparation.* — Le monomère est un gaz, on le prépare industriellement par addition d'acétylène et d'acide chlorhydrique :

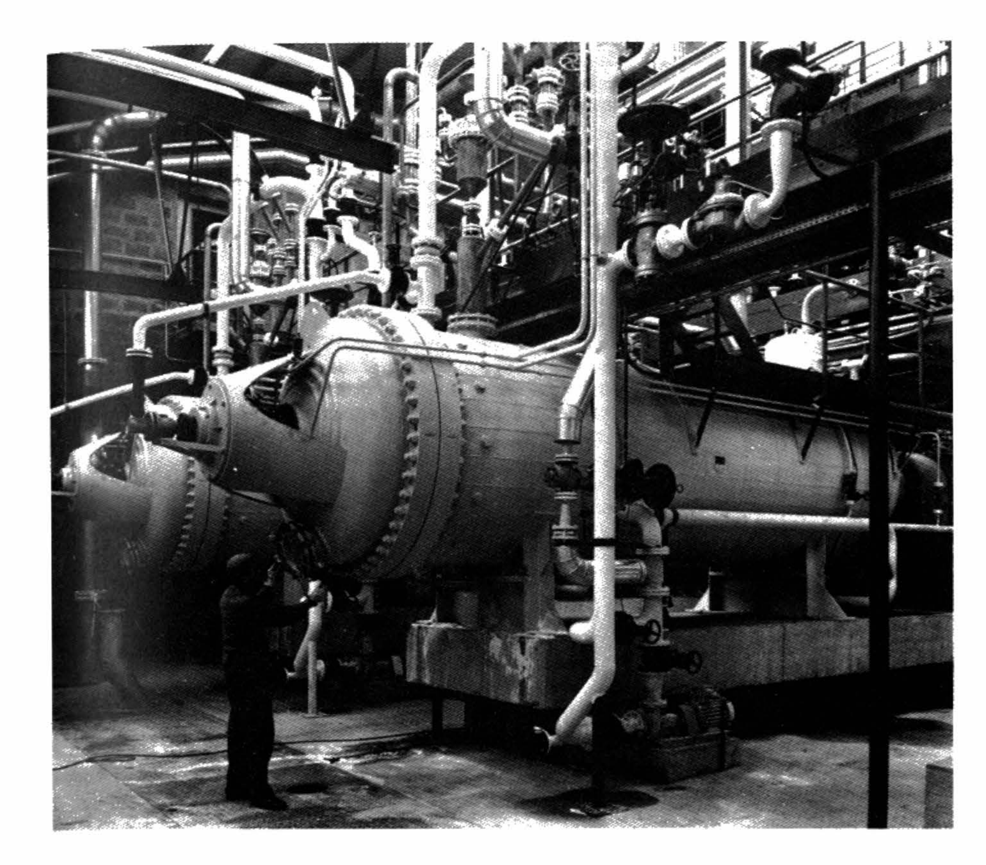
$$CH \equiv CH + HCl \rightarrow CH_2 = CHCl$$

ou d'éthylène et de chlore :

$$CH_2 = CH_2 + Cl_2 \rightarrow \underset{\text{(dichloréthane)}}{CH_2Cl - CH_2Cl} \rightarrow CH_2 = CHCl + HCl$$

Ce gaz, à point d'ébullition de —13,4 °C, agréable d'odeur, très inflammable et très dangereux, se comprime facilement ; il est polymérisé en présence de catalyseurs, à chaud et sous pression, en masse, en suspension ou en émulsion.

Tous les paramètres ont une influence sur les résultats obtenus : si la quantité de catalyseur est faible et la tempé-



Autoclaves horizontaux pour polymérisation en masse du PCV
(*Rhône-Poulenc S.A.*)

Ateliers de chlorure de vinyle et solvants chlorés
(*Rhône-Poulenc S.A.*)

rature basse, la masse moléculaire est grande et la polymérisation lente. On essaie actuellement d'introduire les techniques de l'automatique pour optimiser la réaction.

2° *Renseignements économiques.* — On trouve le PCV sous forme de poudre, de demi-produits (plaques, barres, tubes), de compositions vinyliques (plastisols, mélanges gélifiés en granulés ou en poudre: *dry blend*).
En France, la production de PCV dépasse un demi-million de tonnes.

3° *Propriétés*

a) *Propriétés physiques et mécaniques.* — Une partie importante de la production est mise en œuvre sous forme de PCV rigide sans adjuvants autres que les stabilisants. Ces matériaux: films, tubes d'adduction d'eau et raccords, joncs et plaques usinables, collables et soudables, ont des caractéristiques sensiblement identiques. Les caractéristiques des autres matériaux sont très variables, depuis la plaque de PCV chargé à 100 % d'amiante en poudre et de carbonate de calcium jusqu'au plastisol très plastifié. Le PCV non gélifié se présente sous forme d'une poudre blanche; après gélification ρ = 1,35 à 1,45 g/cm³; σ_T = 6 à 7 daN/mm²; ε_R = 10 à 50 %; E = 300 daN/mm².
Il donne une déformation ductile à la température ambiante. Il est caoutchoutique à environ 80 °C (fig. IV-7 et IV-8). Ces caractéristiques peuvent varier considérablement pour des produits plastifiés.

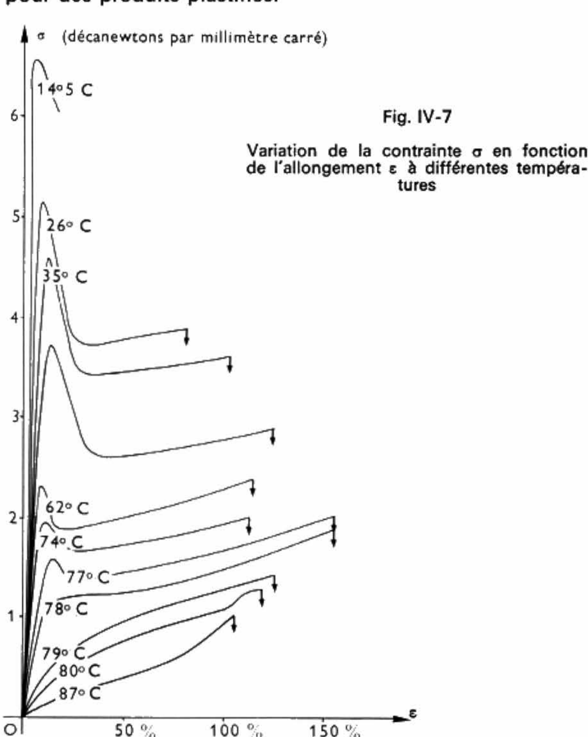


Fig. IV-7

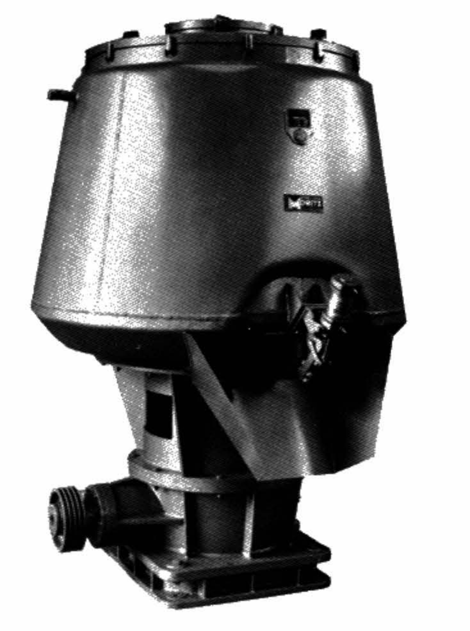
Variation de la contrainte σ en fonction de l'allongement ε à différentes températures

Remarque: Les diagrammes de traction présentés dans ce chapitre n'ont pas toujours été poursuivis jusqu'à la rupture. Ils donnent les caractéristiques au seuil d'écoulement; vitesse de déformation de 100 % par minute.

b) *Caractéristiques électriques.* — La tangente de l'angle de pertes à 50 Hz et à 20 °C est grande: elle peut atteindre $1{,}5 . 10^{-2}$; elle augmente en général avec la présence de plastifiants, ce qui permet de souder les films de PCV plastifiés, par pertes diélectriques, en haute fréquence. La tension de claquage instantanée est comprise entre 30 et 40 kV/mm. La résistivité transversale est très grande: elle est de 10^{15} à 10^{16} Ω.cm; cette résistivité peut décroître notablement pour les produits plastifiés.

c) *Caractéristiques physicochimiques. Absorption d'eau très faible. Inflammabilité nulle.* — Il résiste à la chaleur en exposition continue jusqu'à une température de 60 °C environ. Il brunit à la lumière. Il est soluble dans certains solvants: chlorure de méthylène, cyclohexanone et il gonfle dans d'autres: acétone, mélange sulfure de carbone-acétone. Il résiste correctement aux acides et aux bases.

4° *Méthodes de mise en œuvre classiques.* — Les PCV en poudre sont transformés en semi-produits et en objets. L'introduction d'adjuvants divers constitue souvent une opération intermédiaire. Les adjuvants habituels sont des stabilisants, plastifiants, colorants, extendeurs, charges (le plus souvent minérales). Les produits résultants se présentent sous forme de granulés gélifiés, de poudres sèches, de pâtes. On les appelle souvent encore *compounds*; la désignation officielle récente est *composition vinylique*.
Granulés gélifiés. — Les PCV mélangés aux adjuvants sont gélifiés sur mélangeurs à cylindres et extrudés avec une boudineuse à tête de granulation; avec une extrudeuse longue ou à deux vis on peut éviter le passage sur mélangeur à cylindres.



Turbomélangeur
(*R. et J. Moritz*)

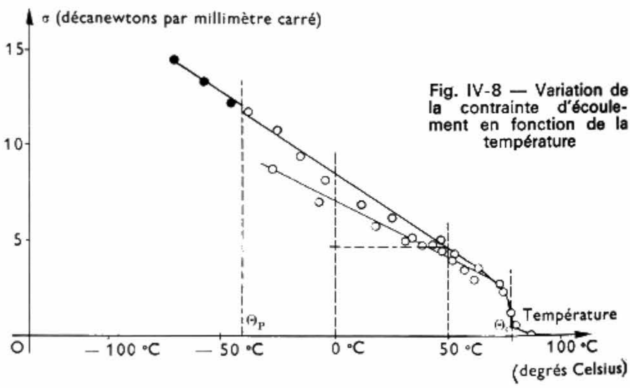


Fig. IV-8 — Variation de la contrainte d'écoulement en fonction de la température

Poudres sèches. — D'autres types de mélangeurs, tels que les mélangeurs «Henschel», peuvent être utilisés pour faire des *dry blends;* on utilise aussi des mélangeurs à ruban *Ribbon blender.* Ces mélangeurs comportent une jaquette chauffante. Le taux de plastifiant est limité et doit être inférieur en première approximation à 50 %. Le mouvement des éléments mobiles doit être assez rapide pour rompre les agglomérats de poudre quand ils ont tendance à se former.
Les plastisols correspondent à des pâtes résultant de la mise en suspension de la poudre de PCV dans les plastifiants, les colorants et les stabilisants. Cette suspension peut être facilement réalisée dans un mélangeur du type werner ou pétrin avec de préférence une prise de vide.
Ces produits, et en particulier les granulés et les poudres, peuvent être extrudés, injectés et calandrés. Par ailleurs,

les poudres et les plastisols donnent lieu à des méthodes de mise en œuvre spéciales.

a) *Extrusion.* — Les boudineuses peuvent être alimentées avec des granulés ou des objets broyés, avec des profilés ou, si leur pouvoir de plastification est suffisant, avec des poudres. Elles peuvent être utilisées pour l'extrusion des profilés souples ou rigides, pour le gainage de conducteurs électriques, pour l'extrusion de plaques ondulées ou planes.

b) *Injection.* — L'injection du PCV rigide était extrêmement difficile avant l'apparition de presses à injection à vis mobile en translation, c'est maintenant chose courante. L'injection du PCV plastifié peut se faire exceptionnellement en faisant débiter une boudineuse directement dans un moule monté sur un manège. Cette technique est employée pour la réalisation des chaussures de plage, des bottes et des jouets.

c) *Compression.* — Dans certains cas (carreaux de revêtement de sol en particulier), on tire un crêpe sur le mélangeur à cylindre et on le découpe en ébauches carrées, qui sont moulées dans un moule métallique. Les plaques de PCV rigides sont obtenues par empilement de plaques primaires calandrées, de 0,5 mm d'épaisseur, que l'on comprime entre les plateaux d'une presse chauffante.

d) *Extrusion-soufflage.* — L'extrusion-soufflage permet de fabriquer jouets et bouteilles; dans ce dernier cas, on utilise des « mélanges alimentaires » rigides et des installations hautement spécialisées.

e) *Calandrage.* — Le calandrage est utilisé pour la fabrication de films en PCV rigide et de films en PCV plastifié; dans ce dernier cas, les films sont souvent grainés et imprimés. Le même matériel, très coûteux et très précis, peut être utilisé pour « coucher » du PCV plastifié sur des supports textiles.

f) *Les semi-produits* se collent, se soudent, s'usinent, et se forment bien.

5° *Méthodes de mise en œuvre spéciales*

Plastisols. — Les pâtes de plastisols correspondent à des suspensions. L'établissement d'un gradient de température dans cette suspension, par exemple, par conductibilité thermique, à partir d'une surface métallique chaude, fait que les particules de PCV se laissent pénétrer par le plastifiant et que la suspension se transforme progressivement en gel par suite de l'augmentation du volume des particules.

L'épaisseur du gel dépend du plastisol, de la température de la surface métallique éventuellement de la capacité calorifique de l'ensemble (trempé) et, aussi, de la durée de contact. Cette épaisseur peut être contrôlée relativement facilement.

a) *Trempé.* — Cette technique, peu employée pour la fabrication d'objets, l'est beaucoup plus pour faire des revêtements de surface, en particulier pour les pièces ajourées: grillage, panier de galvanoplastie, égouttoir à vaisselle. Cette technique est de plus en plus concurrencée par celle faisant appel à un lit fluidisé.

Principe (fig. IV-9):

b) *Embouage (slush molding).* — Le plastisol est versé dans un moule, qui est ensuite placé dans une étuve.

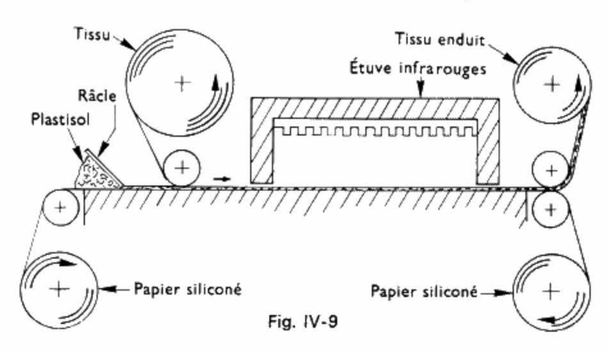


Fig. IV-9

c) *Embouage rotatif, moulage par rotation.* — Le moule contenant le plastisol est entraîné en rotation dans une enceinte chauffée.

d) *Enduction.* — Avec un support en tissu (toile indéformable ou jersey de coton et dans certains cas, sous-couche cellulaire) l'enduction se fait à la râcle (fig. IV-10); le contrôle de l'épaisseur, comme dans le cas du calandrage, peut se faire sans contact avec une jauge à rayonnement β. Tous les plastifiants ne conviennent pas pour faire des plastisols destinés à l'enduction: quand ils sont mal choisis, le tissu sépare les constituants.

e) *Technique des poudres.* — Les poudres de PCV peuvent être utilisées dans des conditions qui ressemblent à celles de la technique des plastisols. Ces poudres sont préparées par la technique du *dry blend.*

6° *Normalisation. Marque de qualité.* — Des essais spéciaux ont été rendus nécessaires par les caractéristiques particulières des compositions vinyliques; citons:

— migration des plastifiants;
— évaporation des plastifiants sur charbon actif.

Par ailleurs, l'alimentation directe d'une extrudeuse, par exemple, avec une poudre, présente un intérêt évident et souvent une difficulté qu'il faut apprécier; des essais permettent de contrôler l'aptitude d'une poudre à s'écouler à travers une trémie.

Marques de qualité :

Plusieurs marques de qualité existent gérées par le C.E.M.P. Elles concernent:

— les tuyaux en PCV rigide;
— les raccords collés;
— les lames de volets.

7° *Applications.* — Des dizaines de milliers de tonnes de PCV sont utilisées en France sous forme de plaques, feuilles, films calandrés ou extrudés, revêtements de sol calandrés, tissus enduits, tubes et tuyaux, câbles électriques, bouteilles, chaussures, profilés.

Citons la fabrication des profilés en PCV plastifié pour l'automobile, les plaques ondulées extrudées, les films plastifiés utilisés en agriculture pour la réalisation de réserves d'eau ou de tunnels de forçage, etc., les bouteilles fabriquées par extrusion-soufflage en PCV rigide, les cuirs synthétiques, les jouets en plastisols, les installations chaudronnées.

Remarque : Un certain nombre de PCV modifiés sont commercialisés, c'est le cas en particulier des PCV surchlorés (PCCV), qui contiennent 65 % de chlore environ au lieu de 57 %; ils s'obtiennent en traitant le PCV par le chlore ou le chloroforme. Les atomes de chlore prennent la place de l'hydrogène. Les PCCV ont des propriétés voisines de celles du PCV, sont plus fragiles au choc, et leur degré Vicat est plus élevé: 100 °C à 115 °C contre 80 °C. On en fait des vernis, des fibres et des raccords pour les tubes. On envisage d'en faire des tubes de chauffage central.

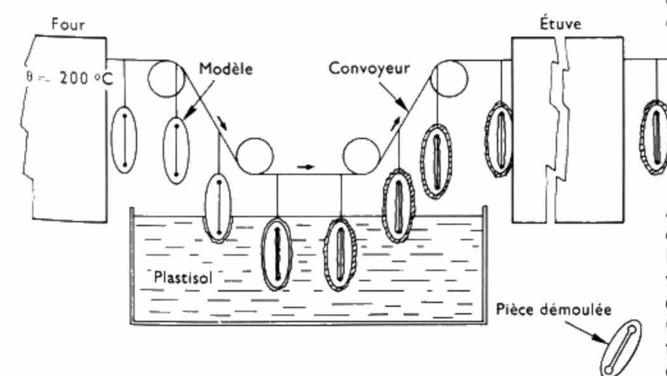


Fig. IV-10

2.2.2. Acétate de vinyle et copolymères chlorure-acétate de vinyle

1° *Préparation.* — L'acétate de vinyle est préparé par action de l'acide acétique sur l'acétylène :

$$CH_3\,COOH + CH \equiv CH \rightarrow CH_3 - CO_2 - CH = CH_2.$$

La polymérisation est obtenue par les trois procédés décrits.

L'acétate de vinyle peut copolymériser avec le chlorure de vinyle et donner le polychloro-acétate de vinyle ou polyacétochlorure de vinyle. La copolymérisation peut se faire en masse, en solution, en suspension ou en émulsion, en agissant sur les conditions opératoires et les pourcentages des monomères dans le mélange ; on obtient des copolymères CV/AC entre 4/96 et 50/50.

Dans le but de faire des colles, on fait des copolymères CV-AC-anhydride maléique, ce dernier constituant ne représentant qu'une fraction de quelques centièmes de l'ensemble.

$$\begin{array}{l} O = CH - C\!\!\begin{array}{l}\nearrow O\\ \searrow\end{array}\\ \qquad\qquad\quad O\\ O = CH - C\!\!\begin{array}{l}\nearrow\\ \searrow O\end{array}\end{array}$$

2° *Renseignements économiques.* — La production d'acétate de polyvinyle atteint plusieurs dizaines de milliers de tonnes.

Ces produits sont commercialisés en poudre, en émulsion et en solution.

3° *Propriétés.* — *L'acétate de polyvinyle* a une masse volumique de 1,2 g/cm³ ; il est incolore, inodore, transparent, peu résistant à l'eau mais il résiste assez bien à la lumière, à la chaleur, aux huiles, graisses et cires ; il présente une bonne adhésivité. Il peut être plastifié.

Les copolymères ont des propriétés qui dépendent des pourcentages de monomères ; elles sont intermédiaires entre celles du PCV et de celles de l'acétate. Ils sont blanchâtres et inertes vis-à-vis de la plupart des composés chimiques. Ils admettent les mêmes plastifiants que le PCV. Ils sont solubles dans les cétones. Leur stabilité est bonne dans les acides et bases fortes mais mauvaise dans les acides concentrés.

4° *Mise en œuvre.* — L'acétate de polyvinyle est surtout utilisé sous forme de solution ou d'émulsion ; on ne l'injecte pas, on ne l'extrude pas.

Les copolymères sont employés sous les mêmes formes ; de plus on les met en œuvre par tous les procédés classiques d'injection, d'extrusion, de compression, etc.

5° *Applications de l'acétate.* — Colles, peintures en émulsion, empesage permanent, apprêt pour les feutres, imperméabilisation de papiers ou de cartons d'emballage pour les huiles et les graisses, agglomération de copeaux.

Applications des copolymères. — Colles à métaux, imperméabilisation de tissus, disques microsillons.

2.2.3. Alcool polyvinylique

1° *Préparation.* — L'alcool polyvinylique n'est pas obtenu par polymérisation de l'alcool vinylique mais par hydrolyse des polyacétates :

$$\left[- CH_2 - \underset{\underset{\underset{\underset{CH_3}{|}}{C = O}}{|}}{\underset{|}{\underset{O}{|}}}{CH} - \right]_n + n\,HOH \rightarrow$$

$$n\,CH_3\,COOH + \left[- CH_2 - CHOH - \right]_n$$

Les polyalcools vinyliques commerciaux contiennent toujours un certain pourcentage d'acétate non transformé.

2° *Propriétés.* — $\rho = 1{,}2$ à $1{,}3$ g/cm³ ; $\sigma_T = 0{,}7$ à 3 daN/mm² ; $\varepsilon_R = 300$ à 600 % (fig. IV-11).

C'est une poudre blanche, soluble dans l'eau, surtout dans l'eau froide, et *insoluble dans la plupart des solvants organiques*, sauf dans les polyalcools qui servent de plastifiants. Toutes les propriétés dépendent de l'indice de polymolécularité du polyacétate de vinyle initial et du pourcentage de groupes acétyl restants. Ils résistent mal aux acides et bases fortes et moyennement aux acides et bases faibles. L'absorption d'eau en 24 heures est supérieure à 30 %.

3° *Mise en œuvre.* — Tous les procédés habituels sont utilisés mais peu répandus ; on met en œuvre des produits plastifiés par l'eau que l'on évapore.

4° *Utilisation.* — Apprêts, films pour démoulage des polyesters, revêtements photosensibles (l'alcool polyvinylique contenant du bichromate de soude, est insolubilisé par exposition aux UV et il permet la réalisation de plaques pour impression lithographique), colles, tuyaux, joints, courroies de transmission, etc.

Remarque : Le polyalcool vinylique est susceptible de cristalliser mais nous l'avons mis dans ce chapitre car le taux de cristallinité est généralement faible.

2.2.4. Les acétals polyvinyliques (ne pas confondre avec les polyoxyméthylènes appelés *résines acétals*). —

On désigne sous ce nom les dérivés de l'acétate de polyvinyle, hydrolysé, traité par des aldéhydes formique, acétique, butyrique, d'où les noms de formal, acétal, butyral polyvinylique donnés aux corps correspondants.

1° *Préparation.* — On « acétalise » l'alcool polyvinylique par un aldéhyde ou un mélange d'aldéhydes en milieu acide :

$$\ldots - CH_2 - \underset{OH}{\underset{|}{CH}} - CH_2 - \underset{OH}{\underset{|}{CH}} - \ldots + R - CHO \rightarrow$$

$$\rightarrow - CH_2 - \underset{O}{\underset{|}{CH}} - CH_2 - \underset{O}{\underset{|}{CH}} - \ldots \quad \text{(les deux O liés à } \underset{R}{\underset{|}{CH}}\text{)}$$

La réaction est souvent incomplète et des groupes hydroxyle et acétyle coexistent avec les groupes acétal dans la même molécule.

$$\ldots - CH_2 - \underset{O}{\underset{|}{CH}} - CH_2 - \underset{O}{\underset{|}{CH}} - CH_2 - \underset{OH}{\underset{|}{CH}} - CH_2 - \ldots \quad \text{(les deux O liés à } \underset{R}{\underset{|}{CH}}\text{)} \qquad - \underset{COOCH_3}{\underset{|}{CH}} - \ldots$$

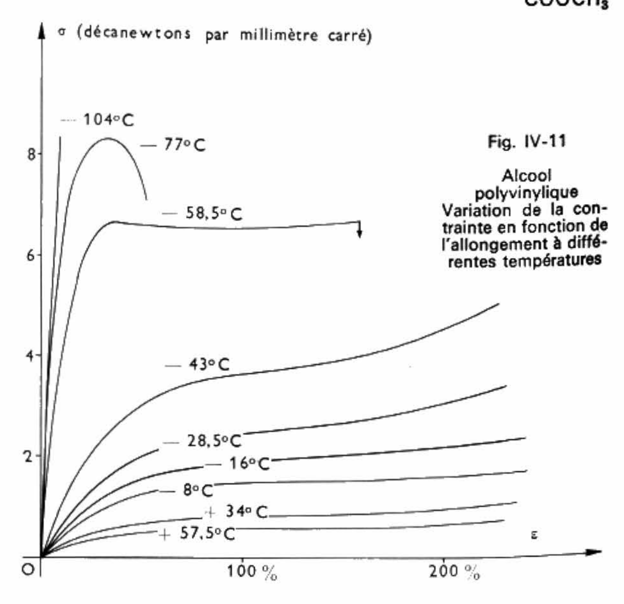


Fig. IV-11
Alcool polyvinylique
Variation de la contrainte en fonction de l'allongement à différentes températures

2° *Propriétés.* — Les masses volumiques de ces corps sont voisines de 1,2 g/cm³. Ils sont transparents et leurs propriétés dépendent évidemment du pourcentage des trois groupes latéraux, de la longueur de la chaîne, etc. Leur module d'Young peut atteindre 200 daN/mm² pour le formal polyvinylique à mouler; il peut être extrêmement faible pour certains butyrals plastifiés. Leur absorption d'eau est comprise entre 1 et 2 %.

3° *Mise en œuvre.* — Tous ces produits peuvent être injectés, extrudés, coulés, filés mais on les utilise peu de cette façon. Ce sont essentiellement des vernis, des produits d'enduction; les acétals bien acétalysés servent à faire des enduits hydrophobes pour l'imperméabilisation des tissus. On utilise les butyrals pour faire des verres de sécurité. Les résines acétals sont employées pour la fabrication d'apprêts, de colles thermocollables, de *wash primer*, etc.

2.2.5. Le polystyrène. — Le polystyrène commercialisé actuellement est un polymère, amorphe et atactique, du styrène.

1° *Préparation*

a) *Préparation du monomère.* — Le styrène ou vinylbenzène, a pour formule $C_6H_5—CH = CH_2$. Il a été préparé en 1865 par Berthelot mais on connaissait déjà, en 1845, le Styrax, sécrétion résineuse d'un arbre d'Asie mineure. La mise au point industrielle a été faite aux États-Unis d'Amérique et en Allemagne vers 1937. On part de l'éthylène et du benzène et on obtient l'éthyl-benzène que l'on déshydrogène

$$C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_5—CH_2—CH_3$$

$$C_6H_5—CH_2—CH_3 \xrightarrow[\text{génation}]{\text{déshydro-}} C_6H_5—CH = CH_2 + H_2$$

b) *Polymérisation.* — En masse, en émulsion, en suspension.

2° *Renseignements économiques.* — Le polystyrène existe sous forme de granulés, de films, de produits expansés, d'objets moulés.

Il est de plus en plus utilisé sous forme de copolymères et de mélanges que nous étudierons plus loin. On produit des dizaines de milliers de tonnes de polystyrène sous forme de PS standard et de PS choc qui est, comme nous le verrons, un polystyrène-butadiène.

3° *Propriétés*

a) *Propriétés physiques.* — Solide transparent, naturellement incolore, de masse volumique égale à 1,05 g/cm³, il donne au choc un son métallique.

b) *Propriétés mécaniques.* — E = 300 daN/mm², allongement à la rupture faible, inférieur à 4 % pour des contraintes voisines de 4 daN/mm². Le polystyrène est fragile; il donne des ruptures au choc jusqu'à des températures proches de 80 °C; il devient caoutchoutique à partir de 100 °C. Son coefficient de dilatation linéaire est voisin de $6 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}.

c) *Propriétés électriques.* — Le polystyrène est caractérisé par une tangente d'angle de pertes très faible: 1 à $3 \cdot 10^{-4}$; c'est donc un excellent isolant en haute fréquence. La tension de claquage instantanée est élevée et comprise entre 20 et 25 kV/mm. Il conserve malheureusement longtemps les charges statiques.

d) *Propriétés chimiques.* — Il est inflammable mais on peut le rendre autoextinguible; son absorption d'eau est extrêmement faible. Il gonfle dans l'acétone. Il résiste bien aux acides dilués et aux bases même concentrées. Il est sensible aux hydrocarbures aromatiques et aliphatiques.

4° *Méthodes de mise en œuvre.* — Toutes les méthodes de mise en œuvre habituelles sont utilisées: injection, extrusion, formage, éventuellement calandrage et compression; cette dernière technique est très rarement employée, de même que les techniques des poudres, bien qu'il semble que des études aient été faites à ce sujet en U.R.S.S.

L'extrusion-soufflage donne des soudures peu satisfaisantes et cela rend intéressante la technique d'injection-soufflage, qui permet de supprimer la soudure du fond. Une technique spéciale est mise en œuvre pour réaliser des pièces en polystyrène expansé.

Moulage de pièces en polystyrène expansé. — On part de granulés expansibles, contenant un agent volatil qui est introduit au moment de la polymérisation. On « prémousse » ces granulés qui sont placés dans un moule percé de trous, dans lequel on fait circuler de la vapeur à 140-150 °C. Les granulés s'expansent sur place et se soudent les uns aux autres. Ces produits expansés peuvent atteindre une masse volumique inférieure à 0,015 g/cm³. Les cellules non communicantes ont des dimensions moyennes de quelques centièmes de millimètre. On peut obtenir des profilés ou des plaques par extrusion, les cellules ont alors quelques dixièmes de millimètre de diamètre. Ce produit est fabriqué en feuilles minces (1 mm d'épaisseur), qui peuvent être formées. Les formes sont peu profondes, le chauffage est fait par rayonnement infrarouge et l'opération doit être programmée au dixième de seconde.

5° *Normalisation.* — Les essais sur produits expansés sont effectués conformément aux textes AFNOR signalés plus haut.

6° *Applications.* — Ce matériau est fragile. C'est un remarquable isolant électrique utilisé pour faire des vasques d'éclairage, des meubles, des isolants électriques, des isolants thermiques expansés, des jouets publicitaires et des récipients à jeter à cause de son faible prix.

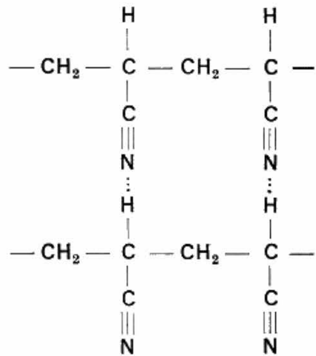
2.2.6. Les copolymères et autres dérivés du styrène. — Pour essayer de diminuer la fragilité du polystyrène, on l'a associé, sous forme de copolymères ou dans des mélanges, à différents autres produits. Les produits résultants sont: le polystyrène-butadiène, le polystyrène acrylonitrile et les ABS.

1° *Préparation.* — Le nitrile acrylique est préparé par action de l'acide cyanhydrique sur l'acétylène.

$$HCN + CH \equiv CH \rightarrow CH_2 = CH—CN$$

Ce produit peut polymériser pour donner le polyacrylonitrile, connu sous forme de fibres textiles aux États-Unis d'Amérique en 1951 et en France en 1954. On a pensé longtemps que le polyacrylonitrile était un produit réticulé, à cause de son insolubilité dans la plupart des solvants, y compris dans son monomère et à cause de sa température de ramollissement légèrement inférieure à la température de fusion (225 °C). On a trouvé quelques rares solvants: succinonitrile, diméthyl formamide : $(CH_3)_2N—CHO$.

L'insolubilité est quelquefois attribuée à des liaisons hydrogène mais cette hypothèse est contestée par certains auteurs.



Ces fibres bien connues résistent admirablement à la lumière et aux micro-organismes.

Le nitrile acrylique peut copolymériser avec l'acétate de vinyle, le chlorure de vinyle et avec le polystyrène.

Le butadiène :

$$CH_2 = CH—CH = CH_2$$

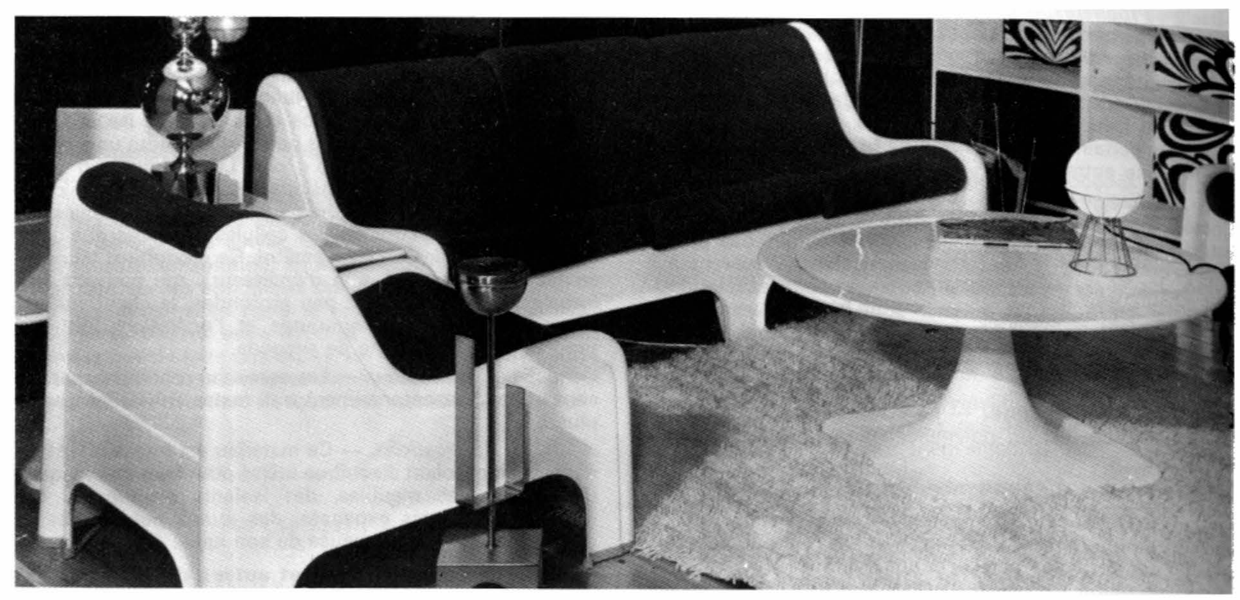
peut être préparé de plusieurs façons, une méthode consiste à fixer le formol sur l'acétylène:

$$CH \equiv CH + 2\,HCHO \rightarrow CH_2OH—C \equiv C—CH_2OH$$
(butyne diol)

On hydrogène le butyne diol (300 bars, 100 °C) en butane diol $CH_2OH—CH_2—CH_2—CH_2OH$ que l'on déshydrate ou à partir de l'alcool (Kebedev, U.R.S.S.):

$$2\,CH_3CH_2OH \rightarrow CH_2 = CH—CH = CH_2 + H_2 + 2\,H_2O$$

Le butadiène polymérisé peut donner des élastomères



Mobilier en polystyrène (*P. Cadé — CDF Chimie*)

et il copolymérise en particulier avec le styrène. Le copolymère 77-23 peut être incorporé dans le styrène par mélangeage avec différents pourcentages. On peut obtenir également des copolymères acrylonitrile, butadiène, styrène, appelés ABS.

Les ABS sont des mélanges à deux phases, la phase vitreuse est généralement du polystyrène acrylonitrile ; la phase dispersée élastomérique est essentiellement constituée par un copolymère greffé complexe, dont la chaîne principale est : polybutadiène-polystyrène-butadiène-polybutadiène-acrylonitrile, chaîne sur laquelle sont greffées des chaînes de polystyrène-acrylonitrile. À l'intérieur de la phase élastomérique, on trouvera donc un mélange de polystyrène acrylonitrile, de l'élastomère, du copolymère greffé.

On peut noter que d'autres produits de même structure peuvent être préparés avec d'autres chaînes comme molécule support de greffe, en particulier les polyisoprène, acrylate de butyle, EPR (copolymère éthylène-propylène).

2° *Renseignements économiques.* — Les copolymères du type SB, SAN, ABS existent sous forme de granulés, de semi-produits (plaques, tubes).

Production. — En 1970 on a produit 25 000 t de ABS, SAN et SBR.

3° *Propriétés*

a) *Propriétés physiques et mécaniques*

Caractéristiques	SB	SAN	ABS
Masse volumique (gramme par centimètre cube)	1,05	1,08	1,06
Transparence	translucide ou opaque	transparent coloré	translucide ou opaque
Module d'élasticité (décanewtons par millimètre carré)	150-250	400	200
Allongement à la rupture	10-90 / 5 %	1 à 3 / 6,5-8,5 %	70 / 3 à 3,5 %
Température de déformation à chaud	50 à 85 °C	90 à 100 °C	75 à 90 °C

Les courbes de traction que l'on peut obtenir respectivement avec les trois produits sont comparées à celle du PS (fig. IV-12). Le travail nécessaire à la rupture est plus grand pour les copolymères que pour les PS, de sorte que la résistance au choc varie dans le même sens.

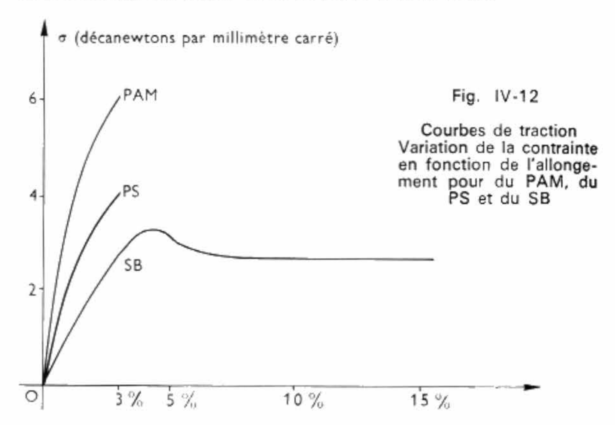


Fig. IV-12

Courbes de traction
Variation de la contrainte en fonction de l'allongement pour du PAM, du PS et du SB

b) *Propriétés chimiques.* — Ces produits ont une bonne résistance aux solvants, en particulier aux hydrocarbures et aux agents chimiques en général.

c) *Propriétés électriques.* — Les propriétés électriques des copolymères et des mélanges à base de polystyrène sont moins intéressantes que celles du PS ; la tangente de l'angle de pertes atteint 6.10^{-3}.

4° *Mise en œuvre.* — Toutes les méthodes de mise en œuvre habituelles (injection, extrusion, formage) sont applicables et appliquées. Le SB est plus facile à injecter que les deux autres qui exigent des pressions d'injection relativement grandes.

5° *Applications.* — Emballage des produits laitiers (dizaine de milliers de tonnes à 6-7 grammes par pot) ; cuves et contre-portes de réfrigérateurs injectées ou formées ; appareils électroménagers ; mobilier.

Polystyrène acrylonitrile. — Bacs d'accumulateurs, feux arrière de voitures, vaisselle résistant aux machines à laver, pièces techniques.

ABS : Capots de machines de bureau et d'appareils électroménagers, carrosseries ; l'utilisation d'ABS métallisés extérieurement se développe.

SBR : Les élastomères SBR (styrène butadiène rubber) sont des copolymères séquencés styrène-butadiène dans lesquels les séquences styréniques très courtes permettent la création de liaisons de Van der Waals remplaçant les

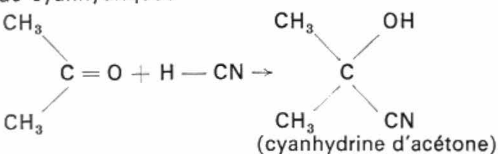
liaisons intermoléculaires habituellement créées par vulcanisation dans le caoutchouc.

Ces liaisons deviennent très faibles dès que le produit est porté à une température supérieure à la température de transition vitreuse du polystyrène ; le copolymère peut alors être injecté et extrudé comme un isopolymère.

2.2.7. Le polyméthacrylate de méthyle. — Les dérivés de l'acide méthacrylique, en particulier les esters, conduisent à des polymères.

1° *Préparation*

a) *Préparation du monomère.* — L'acétone est traité par l'acide cyanhydrique :



La cyanhydrine est traitée par le méthanol en présence d'acide sulfurique concentré à 100 °C :

$$(CH_3)_2C(OH)CN \longrightarrow CH_2 = C(CH_3) — CN + H_2O$$

Puis la fonction nitrile est transformée en fonction acide :

$$\underset{\text{(nitrile méthacrylique)}}{CH_2 = C(CH_3) — CN} \xrightarrow[-\ NH_3]{+\ 2\ H_2O} \underset{\text{(acide méthacrylique)}}{CH_2 = C(CH_3) — COOH}$$

L'estérification par le méthanol conduit au méthacrylate de méthyle :

$$CH_2 = C(CH_3) — COOCH_3$$

qui polymérise.

b) *Polymérisation.* — La polymérisation se fait généralement en masse pour obtenir des joncs, des tubes, des plaques, des blocs, à partir d'un sirop déjà prépolymérisé à 60-70 °C en présence de peroxydes. La polymérisation du PMMA destiné à l'injection et à l'extrusion est réalisée en suspension entre 100 et 120 °C.

2° *Renseignements économiques.* — Les importations représentent 40 % du marché français, soit 2 000 t. L'ouverture du marché a entraîné une baisse des prix.

3° *Propriétés.* — C'est un polymère amorphe, remarquablement transparent dont les caractéristiques principales sont les suivantes : $\rho = 1{,}20$ g/cm³ ; module d'élasticité $E = 300$ daN/mm² à 400 daN/mm² ; $\sigma_R = 4$ à 7,5 daN/mm² ; ε_R comprise entre 3 et 8 % ; $\sigma_{CS} = 7$ à 10 daN/mm² (contrainte au seuil d'écoulement) ; $\lambda = 3$ à 5.10^{-5} °C^{-1}. Le PMMA donne des ruptures fragiles en traction jusqu'à 50 à 60 °C, suivant qu'il est légèrement plastifié ou non. Il est caoutchoutique à partir de 100-110 °C, pour des vitesses de traction de 100 % à la minute (fig. IV-13). Il est ductile, à la température ambiante, en compression, à cette même vitesse. On peut considérer qu'il résiste à 80 °C en exposition continue. Sa tenue à la lumière et aux intempéries est excellente. Son absorption d'eau est faible, comprise entre 0,3 et 0,4 %. Il est soluble dans les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et les cétones. Le PMMA est combustible : les plaques de PMMA extrudées laissent tomber des gouttes enflammées. Il existe des variétés autoextinguibles. Sa résistivité de volume est très grande : 6.10^{17} Ω.cm ; la tangente de l'angle de pertes atteint 4 à 6.10^{-2} et la tension de claquage instantanée est comprise entre 15 et 40 kV/mm. Il se raye d'autant plus facilement qu'il conserve très longtemps des charges statiques.

4° *Mise en œuvre.* — Le méthacrylate de méthyle se coule pour fabriquer des plaques, des joncs, des tubes, des blocs, qui s'usinent, se forment et se collent. On ne les soude pas en général. On peut les polir et les teindre, bien que cela se fasse rarement. Les granulés s'injectent et s'extrudent ; les plaques extrudées sont nettement moins chères que les plaques coulées et font une concurrence sérieuse à ces dernières, bien que leur aspect de surface soit moins bon. Les pièces injectées peuvent être métallisées sous vide ou décorées par peinture.

5° *Applications*

Produits coulés. — Deux marchés importants : l'enseigne lumineuse et, également, le luminaire, qui progresse de 40 % par an dans les entreprises intégrées et chez de petits ou moyens transformateurs spécialisés.

Le formage permet la fabrication de coupoles transparentes (pour des éclairages de terrasses ou pour l'aviation) et de vitres Sécurit. La plaque épaisse est employée pour la réalisation de protections de balcons, de marches d'escaliers. La plaque ondulée sert à faire des toits transparents. Par injection, on réalise des feux arrière pour automobile, des catadioptres, des écussons métallisés pour des appareils électroménagers.

2.2.8. Les cellulosiques. — Les dérivés de la cellulose sont connus depuis longtemps, certains d'entre eux ont encore une grande importance. La cellulose a pour formule brute $[C_2H_{10}O_2]_n$; elle a une structure cristalline, dont les dimensions de réseau ont été déterminées par rayons X. Il semble que les chaînes cellulosiques soient liées parallèlement les unes aux autres par des liaisons hydrogène à l'intérieur de plans parallèles. La cellulose est extraite du

H
— O O —
H

bois et du coton. Les dérivés de la cellulose sont nombreux : viscose, celluloïd, nitrate de cellulose, cellophane, fibre vulcanisée. Certains, comme la cellophane, sont encore très employés ; d'autres, comme la fibre vulcanisée et le celluloïd, sont en voie de disparition.

Fibre vulcanisée. — La cellulose gonflée à l'eau est traitée par le chlorure de zinc ($ZnCl_2$). La cellulose est ensuite lavée, pressée et séchée.

Nitrate de cellulose. — Préparée en 1845 par Schonbein, elle est obtenue industriellement par traitement de la cellulose par un mélange sulfonitrique. C'est un produit très inflammable ; plastifié correctement par le camphre, la « nitrocellulose » donne le *celluloïd.*

Les collodions filés donnent la *rayonne* de nitrocellulose.

La viscose ou « cellulose régénérée » est préparée à partir d'un alcali-cellulose, traité par le sulfure de carbone.

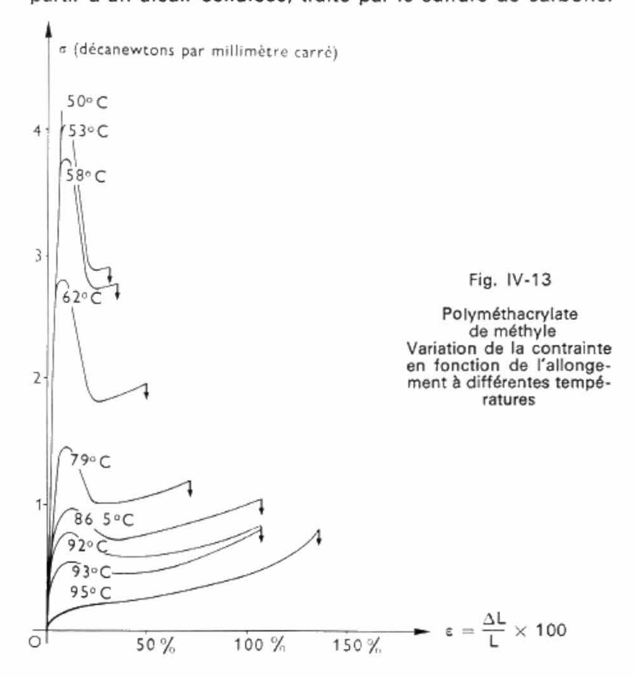


Fig. IV-13

Polyméthacrylate de méthyle
Variation de la contrainte en fonction de l'allongement à différentes températures

On obtient un produit qui, dissous dans la soude diluée, s'appelle « viscose ». La viscose peut être filée et on obtient une « rayonne de viscose » ou coulée à travers une filière et on obtient la *cellophane*. En revanche, les esters cellulosiques : acétate, acétobutyrate et propionate, sont utilisés comme matières à mouler de façon courante. Les éthers-oxydes cellulosiques sont également répandus.

1° *Préparation. Acétate de cellulose.* — La cellulose est traitée par l'anhydride acétique :

$$C_6H_{10}O_5 \text{ ou } C_6H_7O_2(OH)_3 + 3\,(CH_3CO)_2O \rightarrow C_6H_7O_2\,(OCOCH_3)_3 + 3\,CH_3COOH$$

De la même façon on prépare également du *propionate de cellulose* (acide propionique C_2H COOH) ou des esters mixtes *acétopropionate de cellulose et acétobutyrate de cellulose*, en faisant agir les acides propioniques ou butyriques (C_3H COOH) sur les triacétates de cellulose hydrolysés, appelés acétates de cellulose secondaires, qui ont un taux d'acide acétique compris entre 51 et 57 % au lieu de 62,5 %.

Les *éthers-oxydes cellulosiques* sont obtenus par action des chlorures de méthyle ou d'éthyle sur l'alcali-cellulose (on appelle alcali-cellulose un produit d'addition de la cellulose avec la soude) :

$$C_6H_7O_2(OH)_3 + 3\,CH_3Cl \rightarrow 3\,HCl + C_6H_7O_2(OCH_3)_3$$

qui est le triméthyl cellulose. Les groupements méthoxyles O — CH_3 de la formule précédente sont remplacés par des groupements éthoxyles O — C_2H_5 dans l'éthyl cellulose.

2° *Renseignements commerciaux. Production.* — Pellicule cellulosique en 1965 : 30 000 tonnes ; en 1966 : 32 000 tonnes ; en 1969 : 36 500 tonnes ; plus de 50 000 t en 1974.

Acétate de cellulose en 1965 : 9 200 tonnes ; en 1966 : 9 200 tonnes ; en 1969 : 11 500 tonnes ; près de 15 000 t en 1974.

3° *Propriétés.* — Transparents, ils ont des masses volumiques comprises entre 1,10 et 1,25 g/cm³.

La figure IV-14 présente les résultats d'essais de traction à différentes températures sur l'acétate de cellulose.

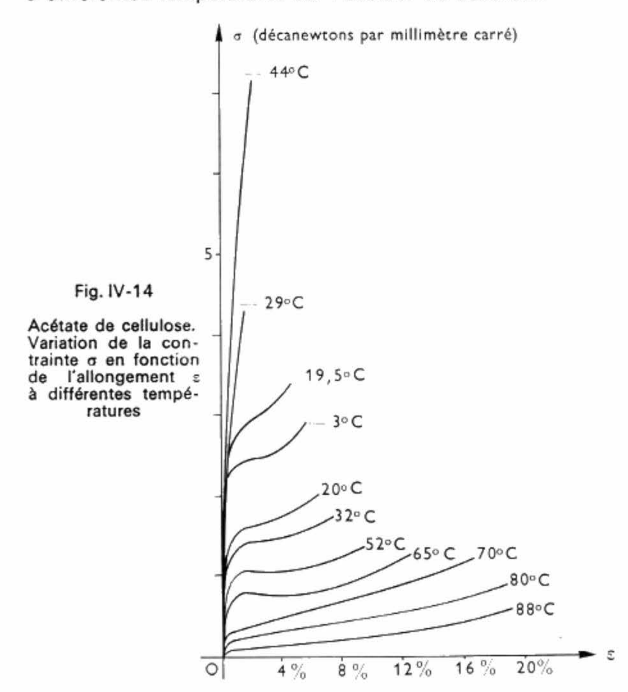


Fig. IV-14

Acétate de cellulose. Variation de la contrainte σ en fonction de l'allongement ε à différentes températures

L'acétate de cellulose a une absorption d'eau importante (4 à 7 %) ; les autres cellulosiques sont moins hydrophiles. Ils sont très faciles à colorer. Ils sont solubles dans de nombreux solvants : cétones, carbures aromatiques, solvants chlorés ; ils résistent mal aux bases concentrées et à l'acide azotique. Ils résistent bien à l'essence et aux acides sulfurique et chlorhydrique dilués. L'acétobutyrate de cellulose a une odeur désagréable. Ils sont peu inflammables (1) et peuvent être rendus ininflammables sans difficulté. La température de ramollissement est basse, voisine de 70 °C. La tension de claquage du triacétate de cellulose est très grande, la résistivité transversale est faible.

4° *Mise en œuvre.* — Elle est faite sous forme de semi-produits, de poudres à mouler ou de vernis.

Feuilles, plaques, joncs, tubes. — Ils peuvent être formés, collés, usinés sans difficulté.

Poudres à mouler. — Faciles à injecter et à extruder, les poudres d'acétobutyrate de cellulose servent à faire des revêtements fluidisés brillants et résistants dans l'essence. Les feuilles d'acétate de cellulose sont coulées à partir d'une solution dans un solvant ; celui-ci est évaporé et la feuille est calandrée. Les plaques sont tranchées à partir d'un collodion ; le solvant est évaporé et les plaques sont pressées à chaud.

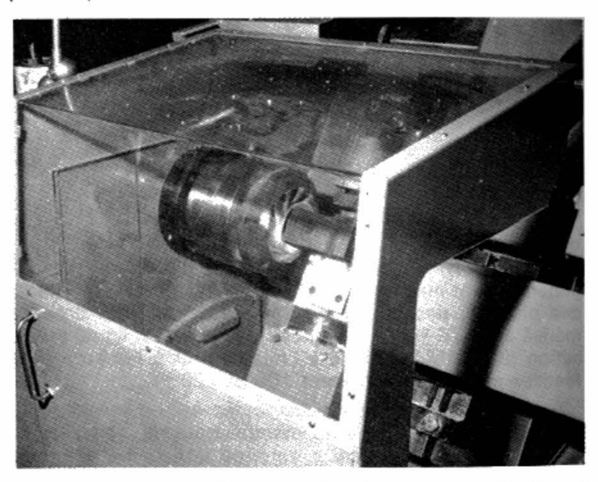
5° *Applications*

Acétate de cellulose. — Films de cinéma, clichés pour rayons X, emballages, isolants pour transformateurs. Pièces injectées : jouets et volants d'automobiles.

Acétobutyrate de cellulose. — Vernis, revêtements fluidisés, pièces injectées, tubes extrudés, récipients extrudés soufflés. On les utilise couramment à cause de leur bonne tenue à l'essence ou au pétrole.

Propionate de cellulose. — Résistant très bien au choc, on en fait des manches d'outils, des talons de chaussures (surtout aux États-Unis d'Amérique).

Les éthers-oxydes cellulosiques, en particulier l'éthyl cellulose, servent à faire des manches d'outils, des cartouches de chasse et des enduits exsudants pelables pour la protection des outils.



Plaque de protection en rhodoïd, matière plastique à base d'acétate de cellulose (*Rhône-Poulenc S.A.*)

2.3. Thermoplastiques. Polymères cristallins

2.3.1. Polyamides. — Les polyamides sont préparés par réaction de diacides sur des diamines, par polycondensation d'aminoacides et par ouverture de la caprolactame.

1° *Préparations*

a) *Préparation de l'acide adipique :*

À partir du phénol :

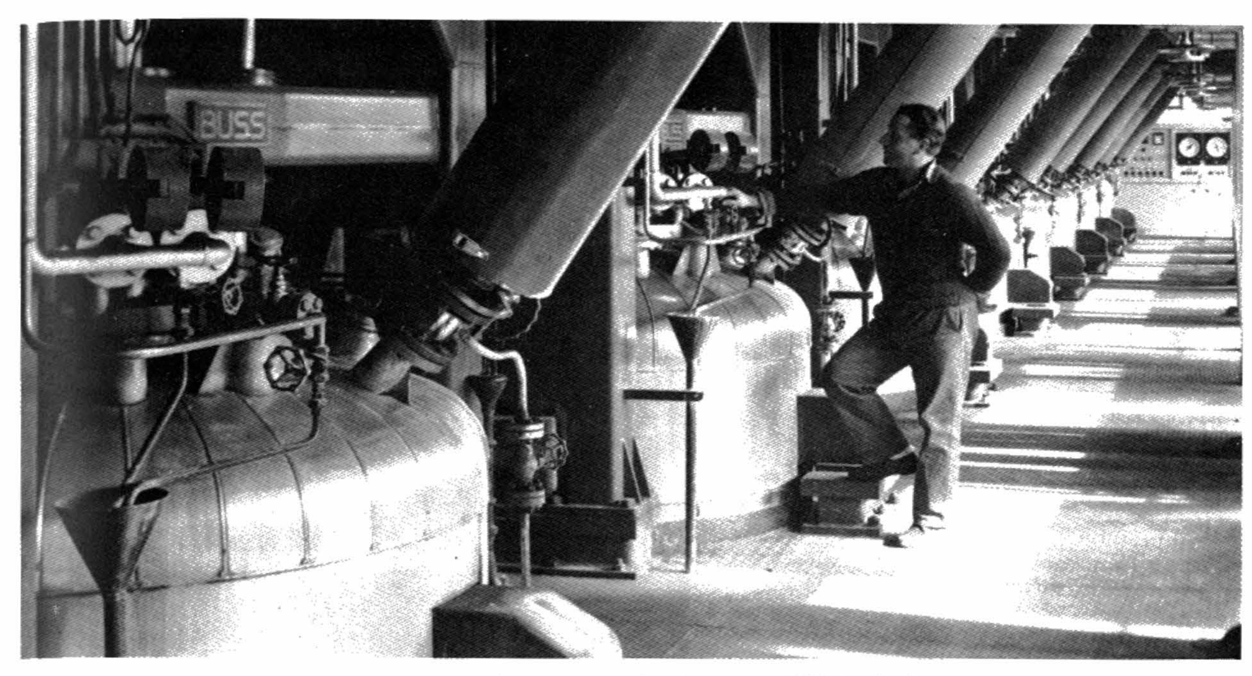
OH   OH

$$\xrightarrow{+H_2} \xrightarrow{\text{oxydation}} HOOC - (CH_2)_4 - COOH$$

À partir du benzène :

$$\xrightarrow{+H_2} \xrightarrow{\text{oxydation}} HOOC - (CH_2)_4 - COOH$$

(1) Les notions d'inflammabilité et d'ininflammabilité sont subjectives et doivent faire référence à un texte de norme pour être significatives.



Pots de polymérisation pour production de « rilsan » (*ATO Plastique*)

b) *Préparation de l'hexaméthylène diamine :*

$$COOH-(CH_2)_4-COOH \rightarrow COONH_4-(CH_2)_4-COONH_4$$

(sel d'ammonium)

Par déshydratation on obtient alors l'adiponitrile :

$$CN-(CH_2)_4-CN \xrightarrow{H_2} NH_2-(CH_2)_6-NH_2$$

c) *Préparation de l'acide amino-undécanoïque :*

On part de l'huile de ricin, qui est un triglycéride, très riche en acide ricinoléique. Par craquage de son ester méthylique on obtient :

$$CH_3-(CH_2)_5-\underset{\substack{|\\ OH}}{CH}CH_2CH=CH-(CH_2)_7COOH$$

$$\rightarrow \underset{\text{(œnanthol)}}{CH_3-(CH_2)_5-CHO} + \underset{\text{(acide undécylénique)}}{CH_2=CH-(CH_2)_8COOH}$$

Ensuite, on forme successivement : $BrCH_2(CH_2)_9COOH$ (par fixation d'acide bromique) puis $NH_2(CH_2)_{10}COOH$.

Polycondensation. — Dans le cas de l'action d'un diacide sur une diamine on obtient un sel qui est purifié ; il est ensuite introduit sous forme de solution dans la cuve de réaction. On opère en autoclave sous gaz inerte ; le produit sort à la partie basse, par une filière, sous forme d'un ruban qui est refroidi et broyé.

2° *Renseignements économiques.* — La production française de polyamides en 1966 était de 12 000 t, elle passe à 14 500 t en 1969. Pour le polyamide 11, la consommation française de 2 500 t se répartit de la façon suivante :

— poudres fines .... 17,5 %
— films, feuilles, gaines .... 15 %
— injection .... 37,5 %
— extrusion .... 30 %

En 1966, le polyamide 11 correspondait sur le marché français à :

100 % des poudres de polyamides utilisées ;
100 % des films de polyamide pour emballage ;
30 à 35 % des produits pour injection et extrusion.

L'exportation des polyamides 11 atteignait 6 500 t, toujours en 1966.

3° *Mise en œuvre.* — Tous les procédés sont utilisables : injection, extrusion, extrusion soufflage, technique des poudres ; toutefois, il faut signaler que les polyamides 6-6, par exemple, sont très fluides à l'état fondu de sorte que leur extrusion présente quelques difficultés. Les poudres de polyamides 6, 6-10 et 12 sont utilisables pour faire des revêtements par fluidisation mais, sur le marché européen, c'est surtout le polyamide 11 qui est employé pour cet usage. Les granulés pour injection sont chargés de fibres de verre, de graphite, de disulfure de molybdène.

4° *Propriétés.* — Leurs masses volumiques sont comprises entre 1,03 à 1,14 g/cm³ et leurs modules d'élasticité entre 150 et 260 daN/mm². Leur contrainte au seuil d'écoulement varie entre 5 et 8 daN/mm² (fig. IV-15, IV-16, IV-17). La reprise d'humidité des polyamides, influencée par les groupements CONH, varie à saturation

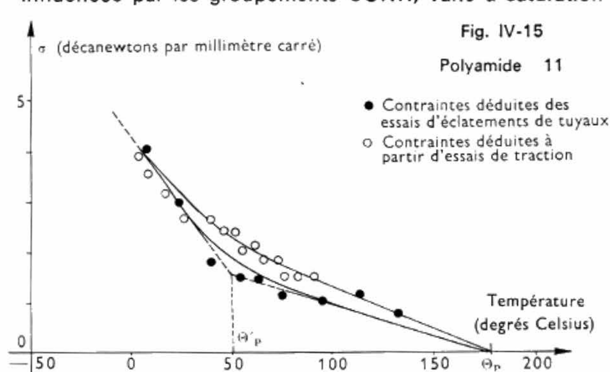


Fig. IV-15

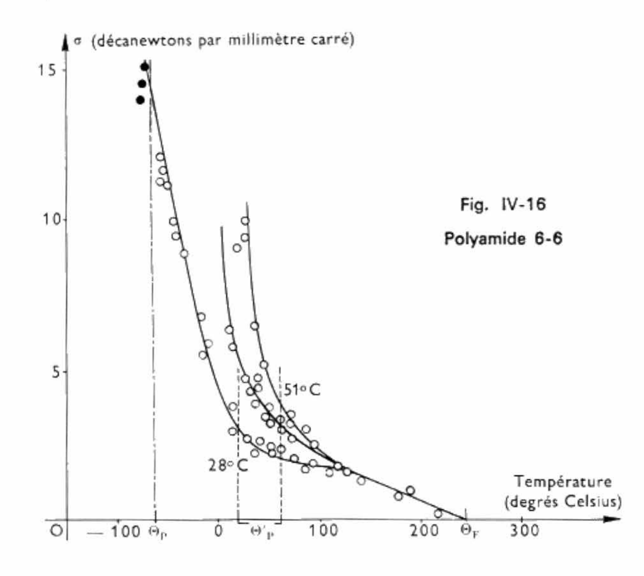


Fig. IV-16

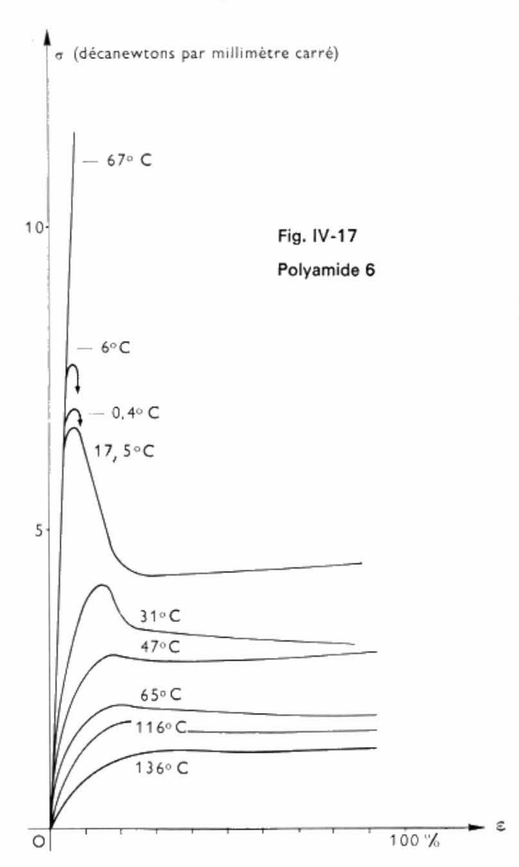
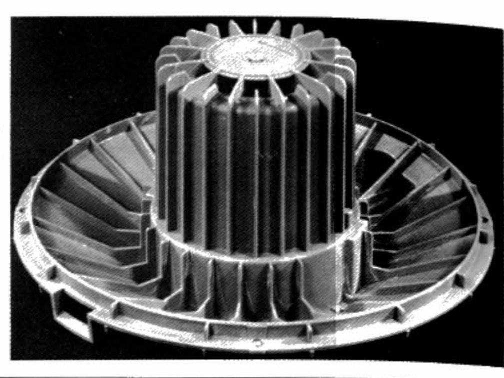


Fig. IV-17
Polyamide 6



Carter en nylon pour aspirateurs (*Micro-photo-Rhône-Poulenc S.A.*)

Support en nylon pour feux arrière d'automobile (*Micro-photo—Rhône-Poulenc S.A.*)

entre 2 et 9 %. Les caractéristiques électriques et mécaniques dépendent de la charge et du taux d'humidité. La tangente de l'angle de pertes varie entre 1 et 4.10^{-2} et la rigidité diélectrique est de 30 kV/mm. Ils sont insolubles dans la plupart des solvants, sauf dans les phénols et les acides minéraux forts. Ils sont peu combustibles.

5° *Normalisation.* — Un certain nombre de méthodes ont été étudiées pour contrôler les polyamides, en particulier leur viscosité en solution. Les fibres de polyamides font l'objet des mêmes essais que les autres fibres.

6° *Applications.* — On les utilise sous forme de fibres, de pièces injectées, de revêtements de surfaces métalliques.

Les caractéristiques recherchées sont les suivantes :

a) *Propriétés mécaniques intéressantes pour une faible densité :* engrenages, turbines, pales de ventilateur.

b) *Résistance à l'usure et faible coefficient de frottement,* en particulier pour l'industrie alimentaire et l'industrie textile (frottement dans l'eau et frottement sec avec des pièces chargées de disulfure de molybdène et de graphite) : paliers, cames, bagues, éléments de pompe, guides-fils, etc.

c) *Résistance aux solvants :* elle justifie leur utilisation dans l'industrie automobile : flotteurs de carburateurs, canalisations de fluides, filtres de pompe, etc.

d) *Température de service relativement élevée :* pièces à usages médicaux supportant la stérilisation, biberons.

e) *Propriétés électriques* intéressantes : carcasses de bobines, bagues isolantes, douilles de lampes, gainage de conducteurs, etc.

2.3.2. Les polyoxyméthylènes. — Ces produits sont connus sous les noms de « polyformaldéhyde » ou de « résine acétal ». Leur formule générale est $\left|- CH_2O -\right|_n$

Le polymère d'ordre 3 du formol (trioxyméthylène ou trioxane) est connu depuis un siècle. En 1920, H. Staudinger a préparé un polymère d'ordre supérieur qui était peu stable.

Les travaux de Staudinger ont été repris en 1940 par la société Dupont de Nemours ; il fallut attendre 1959 pour que l'on réussisse à préparer un matériau de masse moléculaire 150 000, dans lequel les extrémités de chaîne étaient modifiées par estérification de façon à ce qu'elles ne soient pas le point de départ d'une dégradation en chaîne.

1° *Préparation.* — Deux méthodes :

— La méthode Dupont de Nemours, qui consiste à polymériser le monomère correctement purifié.

— Le procédé Celanese et Hoechst, qui consiste à ouvrir le cycle du trioxane en utilisant comme comonomère une trace de dioxolane :

```
        O
      /   \
  H2C      CH2                    CH2 — CH2
   |        |          →           |      |
   O        O                      O      O
     \    /                         \    /
      CH2                            CH2
```

2° *Propriétés.* — Matériau très fortement cristallin, il a une température de fusion voisine de 190 °C et un module d'élasticité de 400 daN/mm². Sa contrainte à la rupture en traction atteint 6,5 à 7 daN/mm² (fig. IV-18 et IV-19).

Il flue peu, a une très grande stabilité dimensionnelle et des propriétés frottantes intéressantes. Sa déformation se fait sans hystérésis. Il possède une température de ramollissement Vicat de 154 °C. Il est utilisé en continu à 80 °C (65 °C en présence d'eau) et par intermittence vers 120 °C. Il possède une résistance exceptionnelle aux solvants et aux produits chimiques autres que les acides et les bases fortes. Son absorption d'eau est faible (0,25 % à 0,9 %). L'addition d'anti-ultraviolets est indispensable pour améliorer la résistance à la dégradation photochimique.

3° *Mise en œuvre.* — Les polyoxyméthylènes peuvent être injectés ou extrudés ; ils permettent la fabrication d'objets par extrusion-soufflage. Ils peuvent être usinés et soudés par pertes diélectriques ou par friction.

4° *Applications.* — Pièces mécaniques, pignons, pignons à couple limite (perceuse portative), bagues

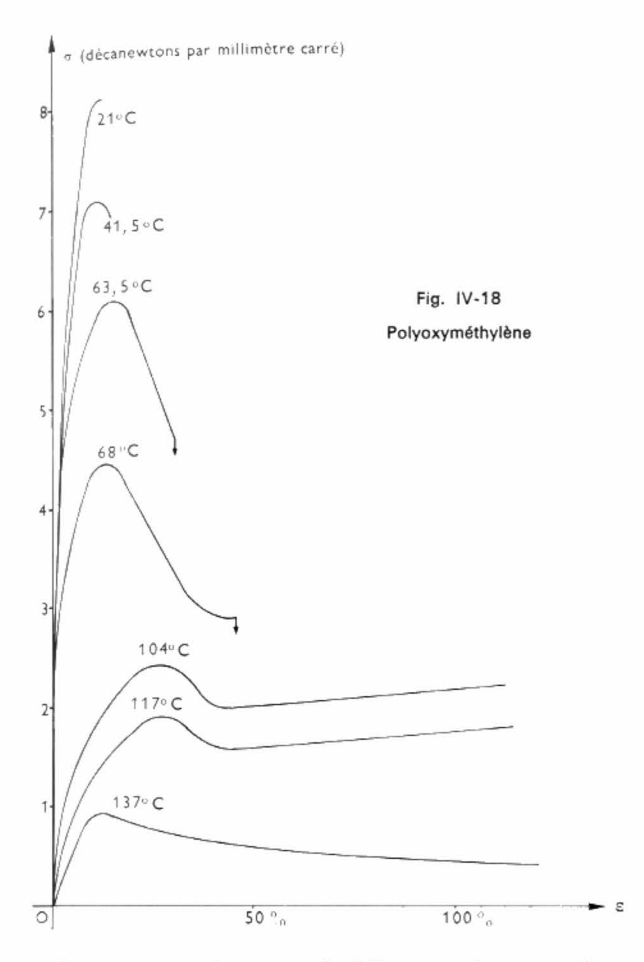


Fig. IV-18

Polyoxyméthylène

toriques en remplacement de billes, remplacement des pièces élastiques métalliques soudées, ventilateurs, poulies, etc.

2.3.3. Polyéthylène

1° *Préparation.* — Les premières traces de polyéthylène ont été décelées en 1933 sous forme pulvérulente à l'intérieur d'un réacteur de la société *Imperial Chemical Industries.* On réussit à en préparer 8 grammes en 1935. Les brevets des I.C.I. datent de 1936. Le développement industriel, justifié par les caractéristiques électriques du PE, datent de 1939 (radar).

En 1941, les Anglais communiquent leurs procédés aux Américains; en 1960, la production mondiale est de 700 000 t; elle atteint plusieurs millions de tonnes aujourd'hui.

En 1950-1955, le professeur allemand K. Ziegler a découvert un autre procédé de polymérisation utilisant des pressions plus basses que celles correspondant au procédé I.C.I. Deux sociétés américaines, Philips Petroleum et Standard Oil, sont arrivées au même résultat avec des catalyseurs différents.

Ce polyéthylène appelé « basse pression » a été fabriqué industriellement à raison de plus 1 600 000 t en 1973.

Le produit de départ est l'éthylène obtenu :

— soit par rectification des gaz de four à coke;

— soit par craquage d'hydrocarbures plus ou moins légers.

L'éthylène doit être très pur; les impuretés (oxygène, eau, acétylène, oxyde de carbone) doivent être limitées à quelques parties par millier.

Polymérisation sous haute pression. — Elle est réalisée sous 1 000 à 3 000 bars et aux environs de 200 °C. Ce procédé conduit à une structure ramifiée.

Polymérisation sous basse pression. — Une pression de 300 bars suffit à la température de 150 °C.

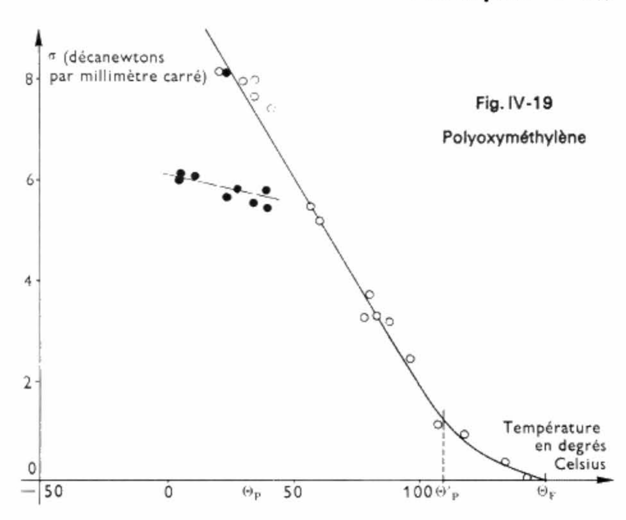


Fig. IV-19

Polyoxyméthylène

Catalyseur :

Procédé Ziegler. — Produit de la réaction d'un halogénure de titane ($TiCl_3$ ou $TiCl_4$) et d'un dérivé organo-aluminique.

Procédé Philips. — Oxyde de chrome réduit et déposé sur un support du type silice-alumine.

Procédé Standard Oil. — Identique au précédent mais il utilise l'oxyde de molybdène.

Les polyéthylènes basse pression sont linéaires, non ramifiés.

2° *Renseignements économiques.* — En France on a observé l'évolution de la production suivante, en tonnes :

	1963	1964	1965	1966	1969	1972
Production . .	64 000	79 100	110 000	126 000	300 000	590 000
Importation . .	35 600	50 800	50 000	78 000	150 000	230 000
Exportation . .	12 100	19 600	32 000	31 000	131 000	320 000
Consommation apparente	88 400	110 300	128 000	173 000	329 000	500 000

Consommation multipliée par trois en cinq ans. La production est passée à 400 000 tonnes en 1970.

3° *Propriétés.* — Physiques et mécaniques (fig. IV-20, IV-21, IV-22, IV-23).

PE haute densité (PE nd)	Haute pression	Basse pression
Masse moléculaire	10 000 à 40 000	100 000 à 1 000 000
Température de fusion (degrés Celsius)	105 à 110	130 à 135
Masse volumique (grammes par centimètre cube)	0,91 à 0,94	0,94 à 0,97
Température de fragilité (degrés Celsius, ...	— 10 à — 70	— 150
σ_T traction (daN/mm²) .	0,4 à 2	2 à 3
ε_R (traction)	650 %	10 à 50 %
Résistance à la fissuration	bonne	médiocre
Perméabilité à l'oxygène (g.s/cm³ par 24 h) . . .	$0{,}3.10^{-9}$	$0{,}07.10^{-9}$
Perméabilité à la vapeur d'eau (ml.s/cm³ et par centimètre de mercure)	3.10^{-6}	$1{,}2.10^{-6}$

Propriétés électriques. — Rigidité : 35 kV/mm ; tangente de l'angle de pertes : 2.10^{-4} à 5.10^{-4} entre 10^2 et 10^{10} Hz.

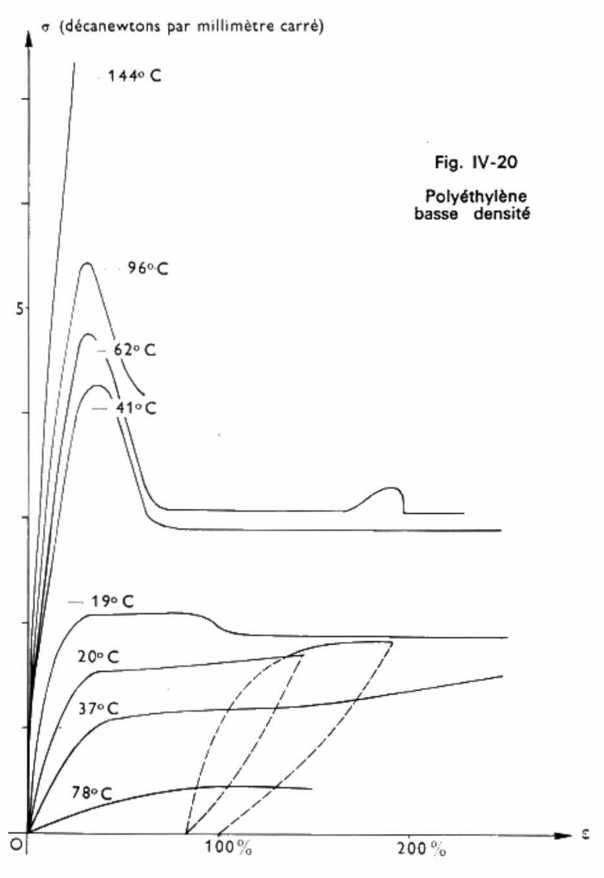


Fig. IV-20

Polyéthylène basse densité

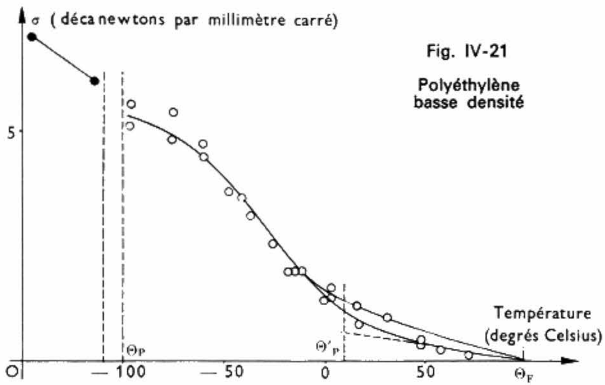


Fig. IV-21

Polyéthylène basse densité

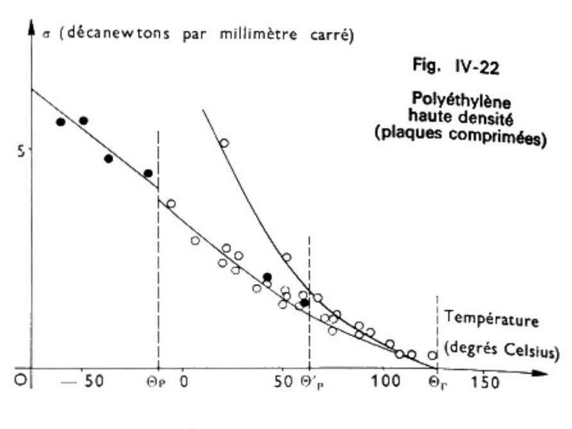


Fig. IV-22

Polyéthylène haute densité (plaques comprimées)

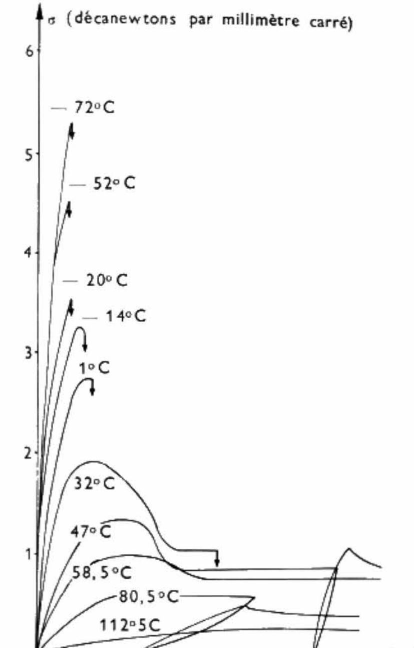


Fig. IV-23

Polyéthylène haute densité

Propriétés chimiques. — Il est insoluble dans les solvants sauf le xylène à chaud et certains hydrocarbures cycliques ou chlorés. Le polyéthylène est combustible.

4° *Mise en œuvre.* — Mise en œuvre courante par tous les procédés habituels : injection, extrusion-soufflage d'objets et de gaines, etc.

Procédés spéciaux. — Technique des poudres :

— moulage rotatif ;

— fluidisation ;

— procédé Engel.

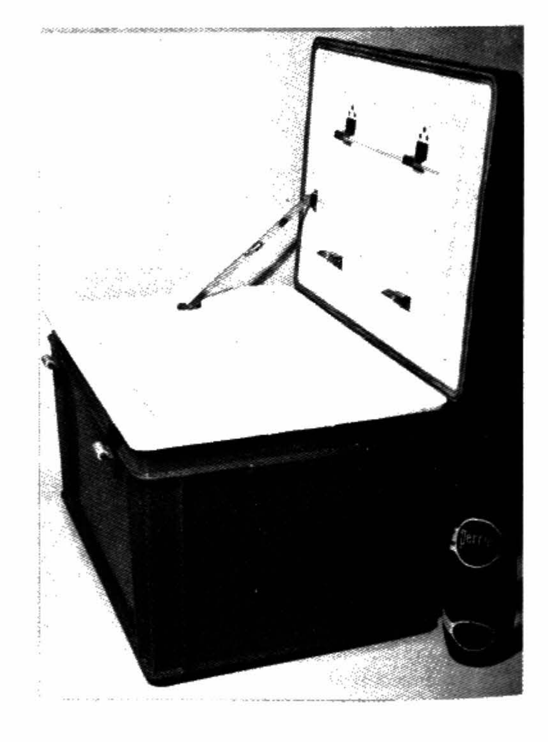
5° *Normalisation*

— marque de qualité des films à usage agricole ;

— tubes haute et basse densité ;

— objets ménagers.

Un certain nombre de textes sont également étudiés par le Centre national d'emballage et de conditionnement (CNEC) (casiers à bouteilles, sacs de grande contenance, housses à matelas, etc.).



Article injecté (glacière) en polyéthylène haute densité (*SODEFINE—Rhône-Poulenc S.A.*)



Article injecté (borne de marquage des champs) en polyéthylène haute densité (*SODEFINE— Rhône Poulenc-S.A.*)



Article soufflé (extincteur de voiture) en polyéthylène haute densité (*SODEFINE— Rhône-Poulenc-S.A.*)

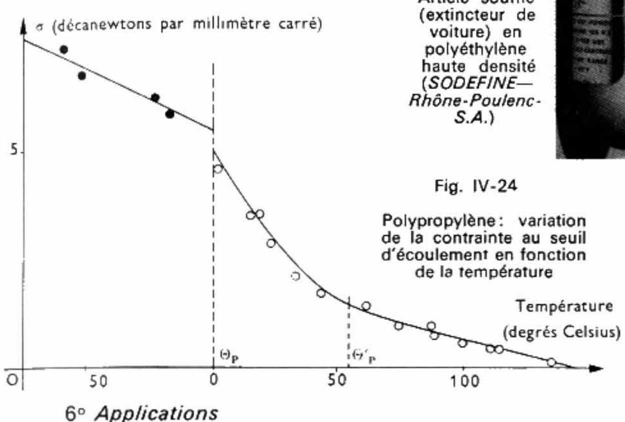


Fig. IV-24

Polypropylène : variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction de la température

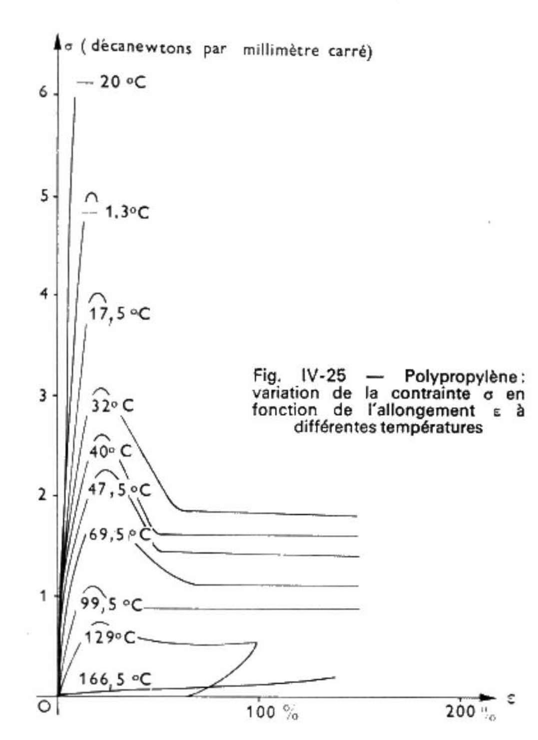


Fig. IV-25 — Polypropylène : variation de la contrainte σ en fonction de l'allongement ε à différentes températures

6° *Applications*

Utilisation du PE en France en 1972 (en tonnes)		
	HP	BP
Extrusion soufflage de films et enduction	250 000	faible
Produits injectés	70 000	55 000
Extrusion soufflage de corps creux	13 000	50 000
Extrusion de tuyaux, câbles profilés	45 000	3 000
Divers..............	6 000	6 000

Électrotechnique. — Radôme, isolement de câbles coaxiaux, isolement de câbles immergés et enterrés (avec addition d'un poison contre les rats et les fourmis). Un câble sous-marin a été immergé entre le Cap Vert et le Brésil, il est immergé jusqu'à 4 000 m et il a fait faire une économie de 40 %.

Sacs de grande contenance. — Bacs pour engrais et aliments pour le bétail.

Il faut noter par ailleurs que l'absence de plastifiant, susceptible de migrer, d'apporter une odeur ou d'être suspect de toxicité, en fait un matériau de choix pour l'emballage alimentaire.

Agriculture. — Paillage, semi-forçage.

Objets ménagers. — Poubelles, casiers à bouteilles.

Fibres. — Les fibres (PE haute densité) servent à faire des cordages qui sont utilisés sur les bateaux et les fibres étirées concurrencent très dangereusement le chanvre et le jute pour la ficellerie (lieuses) et le tissage des tissus industriels.

Automobile. — Cales entre lames de ressort (h.d.), récipients de lave-glace (b.d.).

Le polyéthylène peut également être utilisé comme bouclier contre les radiations neutroniques (bateaux sous-marins et astronefs). Il peut avantageusement alors être chargé de bore.

Modification du polyéthylène :

Réticulation. — Le polyéthylène peut être réticulé par action chimique ou par irradiation.

Action chimique. — On ajoute des peroxydes (en particulier du peroxyde de dicumyle) et en chauffant, la décomposition provoque l'apparition de radicaux libres, le départ d'hydrogène et la formation d'un centre actif sur la chaîne.

$$— CH_2 — CH_2 — \dot{C}H — CH_2 — CH_2 —$$

Deux chaînes ainsi attaquées peuvent mettre en commun leurs électrons célibataires et former une liaison entre chaînes.

Méthode physique : On peut obtenir le même résultat en utilisant l'action de radiations de grande énergie (rayons X).

Ces deux opérations conduisent à des matériaux dont la mise en œuvre est pratiquement impossible, aussi la méthode la plus employée actuellement consiste-t-elle à irradier des gaines de conducteur à la sortie d'une boudineuse ou à associer étirage multi-axial de film et irradiation pour faire des emballages rétractables. Une réticulation modérée remplace la fusion par l'accès à un plateau caoutchoutique.

Modification chimique des polyéthylènes : On peut citer la *chloruration* et la *sulfochloruration*, qui sont réalisées à partir du chlore et du mélange chlore-anhydride sulfureux. Les produits résultants deviennent auto-extinguibles, ils ont une bonne résistance à l'ozone et à l'oxygène et une résistance diminuée à la lumière.

La sulfochloruration donne un produit utilisé comme élastomère de synthèse.

2.3.4. Polypropylène. — Le polypropylène

$$\left[— CH_2 — \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}} — \right]_n$$

est une huile ou une gomme sans consistance, de masse moléculaire faible et naturellement atactique. Les travaux de Natta, effectués en liaison avec la société italienne Montecatini, ont permis depuis une dizaine d'années de produire des polymères stéréoréguliers.

1° *Préparation.* — On utilise des catalyseurs Ziegler-Natta, du même type que ceux qui servent pour le polyéthylène haute densité.

La molécule s'introduit toujours de la même façon entre la surface du catalyseur et la chaîne déjà formée.

2° *Propriétés.* — C'est un polymère cristallin de masse volumique voisine de 0,90 g/cm³. Le polypropylène a une température de fusion nettement plus élevée (voisine de 165 °C) que celle des PE. Ses propriétés mécaniques sont également plus intéressantes (contrainte au seuil, module, etc.) ; en revanche il est fragile à des températures voisines de 0 °C. Les figures IV-24 et IV-25 représentent la

courbe de traction et le seuil d'écoulement à différentes températures. Les propriétés chimiques et électriques de ce polymère sont équivalentes à celles du PE.

3° *Méthodes de mise en œuvre.* — Injection, extrusion, calandrage, extrusion-soufflage sont les méthodes les plus courantes. Les techniques des poudres ne sont pratiquement pas utilisées.

Il faut noter deux particularités : d'une part l'aptitude des pièces injectées à servir de charnière pour peu que la partie amincie, située entre deux parties rigides, soit alimentée perpendiculairement au pli ; d'autre part, la possibilité d'orienter les bandelettes de polypropylène pour réaliser des fibres très résistantes ou des bandelettes destinées à l'emballage.

4° *Applications*

Automobile. — Tableaux de bord, volants, pédales d'accélération, pales réglables de déviation d'air, ceintures de sécurité.

Électricité. — Câbles supportant une température relativement élevée, câbles à haute tension.

Plomberie. — Tuyaux pour eau chaude.

Appareils électroménagers. — Paniers et tambours de machines à laver.

2.4. Polymères et copolymères fluorés

2.4.1. Polytétrafluoréthylène

1° *Préparation.* — Le tétrafluoréthylène est préparé par déshydrochloruration à 700-800 °C du chlorodifluorométhane

$$\begin{matrix} HCl\ CF_2 \\ + \\ HCl\ CF_2 \end{matrix} \longrightarrow 2\,HCl + \begin{matrix} CF_2 \\ \| \\ CF_2 \end{matrix}$$

Le polytétrafluoréthylène

$$\left[\begin{matrix} & F & & F & \\ & | & & | & \\ - & C & - & C & - \\ & | & & | & \\ & F & & F & \end{matrix} \right]_n$$

résulte de la polymérisation du tétrafluoréthylène C_2F_4, gaz incolore bouillant à — 76,3 °C ; la réaction est exothermique ; elle est conduite en présence d'eau pour éliminer la chaleur.

On polymérise en suspension et en émulsion. Le produit résultant est une poudre de granulométrie moyenne comprise entre 75 μm et 350 μm et de densité apparente comprise entre 0,45 et 0,85.

2° *Propriétés*

a) *Propriétés physiques et mécaniques.* — L'ordre des polymères doit être compris entre 100 000 et 700 000, ce qui correspond à des masses moléculaires comprises entre 10 et 70 millions donc particulièrement grandes. Les liaisons intermoléculaires sont très faibles ; les chaînes doivent être très longues pour que les propriétés mécaniques soient suffisantes afin que le matériau puisse être utilisé. Pour obtenir des masses moléculaires de cet ordre, il faut que catalyseurs et monomères soient extrêmement purs.

Structure. — Nous avons vu que la chaîne a la forme d'un zigzag plan sans ramification ni réticulation ; elle s'enroule en hélice avec 13 atomes de carbone par pas de 1,68 nanomètre (1 nm = 10^{-9} m) ; en dessous de 19 °C ; la structure cristalline est triclinique (fig. IV-26).

Au-dessus de 19 °C, le pas devient 1,95 nm et on a 15 atomes de carbone par pas ; le système cristallin devient hexagonal. Au-dessus de 29 °C, la torsion devient irrégulière, mais le système reste hexagonal.

Deux anomalies apparaissent sur la courbe de dilatation du PTFE : elles correspondent à deux points de transition du premier ordre (fig. IV-27).

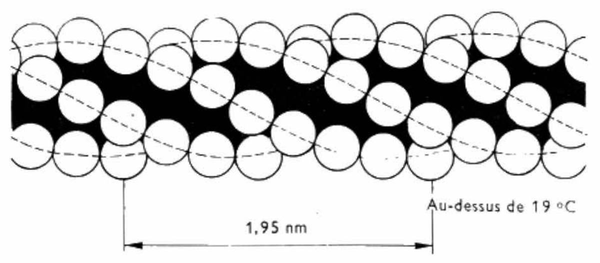
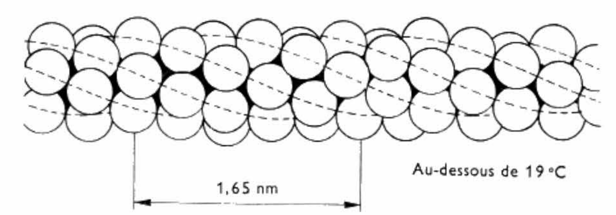


Fig. IV-26 — Configuration moléculaire du PTFE (*Ugine Kuhlmann*)



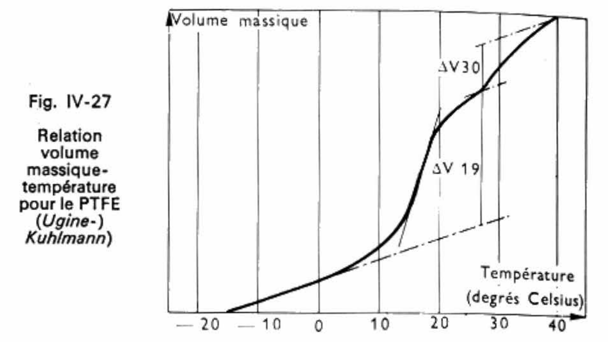


Fig. IV-27 Relation volume massique-température pour le PTFE (*Ugine-*) *Kuhlmann*)

À 327 °C, se produit la fusion des cristallites. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume massique très importante. La fusion permet de passer d'un état solide à un gel très visqueux, transparent sous faible épaisseur. La chaleur de fusion est environ de 685 cal/mole soit la moitié de ce que l'on observe pour le PE, ce qui indiquerait que les molécules conservent un certain degré d'ordre après la fusion.

Masse moléculaire. — La masse moléculaire ne peut pas être déterminée par viscosimétrie, car le PTFE est insoluble dans tous les solvants.

On a proposé une relation donnant la masse moléculaire M_n en fonction de la masse volumique ρ :

$$\log_{10} M_n = \frac{2612 - \rho}{0{,}058}$$

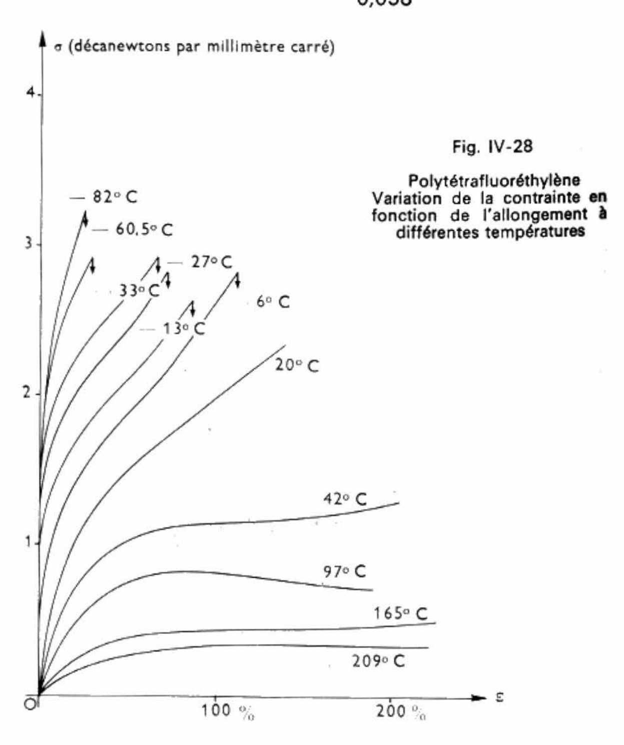


Fig. IV-28 Polytétrafluoréthylène Variation de la contrainte en fonction de l'allongement à différentes températures

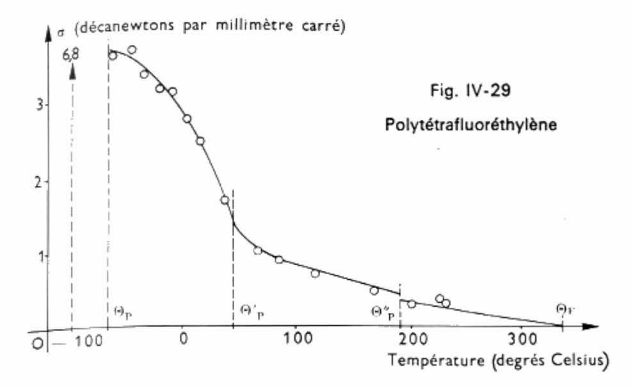


Fig. IV-29

Polytétrafluoréthylène

Cette méthode est approximative, car elle ne peut pas tenir compte des porosités.

Autres caractéristiques. — Coefficient de frottement très bas ; fragile en compression à partir de 4 K ; fragile en traction à environ — 75 °C (fig. IV-27 et IV-28) ; fluage-relaxation : le PTFE flue et se relaxe facilement ; la présence de charges améliore son comportement.

b) *Propriétés chimiques.* — Le PTFE ne contient que du carbone et du fluor. L'énergie de liaison très grande (110 cal/mole) entraîne une très grande inertie chimique, une très grande stabilité thermique (emploi permanent à 250 °C), une ininflammabilité totale et un pouvoir anti-adhérent exceptionnel.

Inertie chimique. — Seuls les corps susceptibles de rompre la liaison C — F peuvent réagir avec le PTFE. Il est attaqué par les métaux alcalins fondus et certains de leurs dérivés : amidure de sodium en solution, naphtalène de sodium dans le THF.

L'attaque entraîne l'apparition d'une coloration brune (doubles liaisons conjuguées).

On utilise cette attaque pour faire des collages.

Le mélange PTFE — titane brûle à 375 °C (température de frittage) ; le fluor et certains dérivés fluorés (ClF_3, UF_6), peuvent agir sur le PTFE, de façon exothermique à température élevée et même à basse température si le PTFE contient des impuretés (le fluor attaque les impuretés, ce qui provoque un dégagement de chaleur et permet l'attaque du PTFE).

Il n'est pas attaqué, même à chaud, par l'eau régale, l'acide nitrique fumant, l'acide sulfurique concentré, l'oléum, l'acide fluorhydrique, le chlore, l'eau oxygénée. Il est attaqué par les bases concentrées chaudes.

Comportement thermique. — À 450-500 °C, il se décompose en donnant le monomère et des dérivés fluorés. Il peut être utilisé entre — 100 et + 260 °C sans que cela entraîne de modification du polymère.

c) *Propriétés électriques.* — De tous les plastiques il est celui dont les pertes diélectriques sont les plus faibles pour une gamme très étendue de fréquences et de températures.

Rigidité diélectrique : 16 à 24 kV/mm.

Résistivité transversale : supérieure à 10^{15} Ω.cm.

Ce matériau ne peut pas être plastifié mais il peut être chargé (charges minérales pulvérulentes, fibres de verre, fibres d'amiante). Les charges modifient évidemment toutes les propriétés.

3° *Méthodes de mise en œuvre.* — Le PTFE nécessite des méthodes de mise en œuvre spécifiques. On utilise les poudres.

Avec des méthodes de moulage :

— La poudre est employée pour faire des préformes à la température ambiante. Les pressions employées sont comprises entre 150 et 250 daN/cm².

— On fritte à 360 °C.

— On refroidit à 315 °C (température inférieure à la température de fusion de 327 °C).

— On termine le moulage à 365 °C et sous des pressions comprises entre 140 et 250 daN/cm².

Extrusion de joncs avec une extrudeuse à piston ou à vis longue et à cylindre refroidi. La vis est à taux de compression nul ; elle est alimentée par un produit préfritté à 360 °C et concassé.

Les dispersions aqueuses de poudre fine de PTFE (0,2 à 0,25 micromètre) sont utilisées pour :

— l'imprégnation de tissus de verre et d'amiante ;
— la préparation de films par coulée ;
— l'isolation de fils électriques spéciaux (pour satellites) ;
— les revêtements de surfaces métalliques.

2.4.2. Polymonochlorotrifluoréthylène. — Découvert aux États-Unis d'Amérique pendant la deuxième guerre mondiale, il polymérise comme le tétrafluoréthylène ; c'est le produit de la polymérisation du monochlorofluoréthylène :

```
F   F
|   |
C = C
|   |
F   Cl
```

Propriétés. — Les polymères de masse moléculaire faible se présentent sous forme d'huile et de cire, dont la viscosité varie rapidement avec la température ; en revanche, leurs qualités lubrifiantes sont excellentes en haute pression et ambiance agressive.

Les polymères de masse moléculaire comprise entre 70 000 et 100 000 se présentent sous forme de poudre blanche, ininflammable, de masse volumique 2,1 g/cm³, amorphes sous forme trempée et cristallins sous forme recuite.

Polymères amorphes : contrainte de rupture en traction 4 à 4,30 daN/mm².

Polymères cristallins : contrainte de rupture en traction 5 à 5,2 daN/mm².

Les allongements à la rupture sont respectivement compris entre 12 et 15 % et 10 et 12 %.

Stabilité thermique. — Elle est bonne entre — 160 °C et + 200 °C.

Inertie chimique. — Chimiquement stables mais ils gonflent en présence d'hydrocarbures halogénés.

Hydrophobes, ils possèdent des propriétés électriques remarquables, même en présence d'eau.

Leurs possibilités de mise en œuvre sont supérieures à celles du PTFE. Leur retrait est faible.

Toutes les méthodes de mise en œuvre leur sont applicables, y compris les techniques de poudres.

CHAPITRE V

AUTRES MATIÈRES PLASTIQUES

Les produits que nous venons de voir représentent, en tonnage, plus de 95 % de la production mondiale des plastiques. Nous avons été obligés, faute de place, de choisir parmi les innombrables matières plastiques fabriquées actuellement et par suite, certaines n'ont pas été examinées.

Il nous semble cependant indispensable, avant de terminer, de décrire très rapidement deux familles importantes : les silicones et les polyuréthannes et de citer quelques produits qui se développent actuellement.

1. LES SILICONES

Nous avons vu leurs méthodes de préparation au chapitre 1, § 1.2.1. Ces produits dérivés du silicium, étudiés par Kipping au début du XXe siècle, sont des huiles, des graisses, des élastomères ou des résines tridimensionnelles thermorigides.

Les silicones possèdent certaines propriétés spécifiques : remarquable stabilité thermique, grande hydrophobie, insolubilité, bonnes propriétés diélectriques. Cela justifie leur

emploi dans des applications généralement techniques bien que le prix de ces matières plastiques soit élevé.

Les *huiles et les graisses* sont des composés macromoléculaires de faible masse moléculaire, dont la viscosité varie peu dans des plages de température très étendues.

Les élastomères conservent également leur propriété élastomérique à des températures extrêmes telles que — 50 °C et + 200 °C. On les utilise donc toutes les fois que l'on a besoin d'un matériau caoutchoutique dans une gamme de températures étendue. Certains élastomères silicones se présentent sous forme de pâtes ou de liquides qui vulcanisent à l'air.

Les résines sont employées pour fabriquer des stratifiés haute pression avec des tissus de verre ou d'amiante; on peut les utiliser jusquà 250 °C.

2. LES POLYURÉTHANNES

L'orthographe polyuréthane, avec un seul *n* a été officiellement abandonnée (Norme ISO TC/61), la terminaison *ane* étant réservée aux carbures saturés.

Ces produits résultent de la polycondensation des diisocyanates et des dialcools ou de polyesters ou de polyéthers. On les rencontre sous forme d'élastomères, de produits expansés rigides ou souples et de vernis. Les produits souples injectables sont des polycondensats linéaires; les vernis, les produits expansés rigides sont des produits à structure tridimensionnelle, obtenus par polycondensation ou par réticulation.

Les produits linéaires résultent de l'association de deux corps bifonctionnels; pour obtenir les autres il faut utiliser un produit possédant plus de deux fonctions réactives (par exemple un trialcool). La réaction type est:

$$2\,n\,(\underset{\text{dialcool}}{OH - R_2 - OH}) + n\,(\underset{\text{diisocyanate}}{O{=}C{=}N - R_1 - N{=}C{=}O})$$

$$\longrightarrow \underset{\text{polyuréthanne linéaire}}{|- R_2OOCNH - R_1 - NHCOOR_2 -|_n}$$

Applications: Les vernis sont utilisés sur le bois, l'acier, le caoutchouc, etc.

Les polyuréthannes expansés souples tendent à remplacer les autres produits pour la réalisation de matelas et de sièges de voiture; les produits expansés rigides peuvent être utilisés pour l'isolation thermique et pour fabriquer des caissons insubmersibles. Ils peuvent être injectés in situ.

Comme nous venons de le voir, silicones et polyuréthannes occupent une place à part dans l'ensemble des plastiques, à cause de la diversité de leurs structures et de leurs formes technologiques. Cette remarque justifie notre hésitation à les inclure dans les chapitres précédents, malgré leur très grand intérêt industriel.

3. AUTRES PRODUITS

— *Les polycarbonates:* le plus répandu est le 4-4'-dioxydiphényl-2-2-propane

$$\left[- C_6H_4 - C(CH_3)_2 - C_6H_4 - O - \overset{O}{\overset{\|}{C}} - O - \right]_n$$

C'est une matière thermoplastique très peu cristalline, transparente, légèrement colorée, très résistante au choc. Elle est utilisée surtout en injection.

Les polycarbonates sont très employés pour faire des pièces mécaniques.

— *Le polytéréphtalate diéthylène glycol:* il résulte de la polycondensation de l'acide téréphtalique et du diéthylène glycol

$$n\,(HOOC - C_6H_4 - COOH) + n\,(HO - CH_2 - CH_2 - OH) \longrightarrow$$

$$\rightarrow |- C_6H_4 - COO - CH_2 - CH_2 - COO -|_n + n\,H_2O$$

C'est un polycondensat linéaire thermoplastique partiellement cristallin. Il est commercialisé sous deux formes principales: les fibres textiles et les films. Ces derniers sont souvent associés dans des bilamés ou peuvent être également métallisés (aluminium). Ils sont le plus souvent biorientés. On les emploie en arts graphiques et pour faire des pellicules photographiques.

Ces produits peuvent être également injectés. Leur température de fusion est voisine de la décomposition et se situe à environ 250 °C. Les films sont très imperméables aux gaz et difficiles à assembler; ils peuvent être soudés à l'aide d'une machine ultrasonique.

— *Les parylènes:* à titre d'exemple, citons le parylène N qui est un polyparaxylène.

$$\underset{\text{xylylène}}{CH_2{=}C_6H_4{=}CH_2} \longrightarrow CH_2 - C_6H_4 - CH_2 - \longrightarrow \left[- CH_2 - C_6H_4 - CH_2 \right]_n$$

Le parylène C est un polyparamonochloroxylylène:

$$\left[- CH_2 - C_6H_3Cl - CH_2 - \right]_n$$

(Masse molaire moyenne: 500 000)

Ces produits sont très cristallins et on les utilise sous forme d'un dimère qui est évaporé et pyrolysé. Le monomère formé se condense sur la pièce à revêtir où il polymérise. La surface revêtue doit être maintenue à basse température pendant l'opération. Ce produit peut donc être fabriqué en couche mince (1 µm) à la surface de produits thermiquement fragiles (composants électroniques). Leur tenue en température est excellente (— 160 °C, + 275 °C), leur température de fusion est comprise entre 280 et 400 °C.

Ces produits sont des matériaux barrières intéressants.

— *Les polysulfones:* Leur formule générale est la suivante:

$$|- R - O - R' - SO_2 - R' - O -|_n$$

Par exemple:

$$\left| - C_6H_4 - C(CH_3)_2 - C_6H_4 - O - C_6H_4 - \overset{O}{\overset{\|}{\underset{\underset{O}{\|}}{S}}} - C_6H_4 - O - \right|_n$$

Ce sont des composés macromoléculaires linéaires, dont les propriétés mécaniques sont intéressantes; en particulier, ils fluent moins que le PC (polycarbonate) et beaucoup moins que le POM (polyoxyméthylène). On les utilise aussi pour leur résistance à la chaleur et au rayonnement.

— *Les oxydes de polyphénylène* (PPO) de formule générale:

$$|- R - O -|_n$$

Exemples:

$$\left| - C_6H_2(CH_3)_2 - O - \right|_n \quad \text{et} \quad \left| - C_6H_4 - O - \right|_n$$

L'oxygène est toujours lié à un groupement aromatique. On peut avoir également:

$$\left| - C_6H_4 - C(CH_3)_2 - C_6H_4 - CH_2 - \underset{\underset{OH}{|}}{CH} - CH_2 - O - \right|_n$$

Ces produits sont très peu perméables aux gaz. Ils possèdent une grande stabilité dimensionnelle et d'excellentes propriétés mécaniques dans une plage étendue de températures: — 40 °C à + 150 °C; ils fluent peu, résistent bien aux bases et aux acides dilués.

— *Les polyimides :* Ce sont des résines thermostables. Exemple de formule générale d'un polyimide :

$$\left[N \begin{matrix} CO \\ CO \end{matrix} R \begin{matrix} CO \\ CO \end{matrix} N - R' \right]_n$$

On fabrique en France des polyimides par polymérisation d'imides cycliques et de diimides dont la double liaison permet l'addition d'amines primaires

$$n \left[\text{maléimide-}N - \langle O \rangle - CH_2 - \langle O \rangle - N\text{-maléimide} \right] + n \left[H_2N - \langle O \rangle - CH_2 - \langle O \rangle - NH_2 \right] \longrightarrow$$

$$\left[HN - \langle O \rangle - CH_2 - \langle O \rangle - NH - \text{succinimide-}N - \langle O \rangle - CH_2 - \langle O \rangle - N\text{-succinimide} \right]_n$$

Les polybismaléimides sont utilisés comme produits thermodurcissables, en particulier sous forme de stratifiés. Ils supportent des températures voisines de 200 à 220 °C en permanence ; avec des charges, ils peuvent être chauffés pendant de courtes périodes jusqu'à 600, 800 et même 1 100 °C.

La plupart des corps qui viennent d'être présentés sont thermostables. Il faut noter qu'ils correspondent à des chaînes comportant des cycles comme le polyphénylène et le perfluorophénylène, dont nous avions déjà signalé la stabilité thermique au paragraphe 2.1.1.

D'autres produits du même type peuvent être cités comme les polyamides obtenus à partir de composés aromatiques ou des produits comportant des hétérocycles azotés ou soufrés (polybenzimidazoles, polybenzothiazoles, pyronnes, etc.). Ils sont actuellement peu développés industriellement.

Bibliographie

Cours sur les plastiques par M. Chatain (*CEMP-ENSAM*)

Plastiques modernes par M. P. Dubois (*Masson et Cie — Paris*)

Les macromolécules et leurs applications par M. G. Champetier (*Les Cours de la Sorbonne — Paris*)

Macromolécules par M.P. Piganiol (*Dunod-Paris*)

Cours de l'Institut du Pétrole par P. Sigwalt

Properties and structures of polymers par M. Tobolsky (*John Wiley and Sons*)

Two phases polymer system par M. S.L. Rosen (*Pol. Eng. and Sci. Vol. 7 ; n° 2 ; avril 1967*)

La thermoformabilité des plastiques par MM. Chatain et Lenne (*Formage des matériaux ; juillet-août 1969 ; avril-mai-juin 1970*)

Les plastiques renforcés par MM. Desjeux et Duflos (*P.U.F. — Paris*)

Contribution à l'étude de la contrainte au seuil d'écoulement des thermoplastes par M. Chatain (*Thèse de doctorat ; Université de Paris 1961*)

Matières plastiques par M. Jousset (*Dunod-Paris*)



CAOUTCHOUCS

Le caoutchouc naturel a été pendant longtemps la seule substance qui pouvait être étirée à plus de dix fois sa longueur et qui reprenait ensuite sa forme initiale, à peu près instantanément et complètement. Aussi a-t-on donné à cette caractéristique le nom d'élasticité caoutchoutique. Bien entendu, des chercheurs se sont rapidement intéressés à une propriété aussi remarquable ; ils ont étudié la composition et la structure de ce matériau, et ont cherché à le reproduire par synthèse. Il ne s'agissait, à l'origine, que de curiosité scientifique, mais le développement des applications du caoutchouc a conduit à envisager la fabrication de produits présentant des propriétés analogues : d'où la mise au point de types variés de caoutchoucs dits « synthétiques ». Un des caractères communs à toutes ces substances est leur masse moléculaire importante ; ils appartiennent donc à la famille des hauts polymères ou composés macromoléculaires, et l'on englobe l'ensemble des produits caoutchoutiques sous un vocable unique : celui d'*élastomères*.

1. CAOUTCHOUC NATUREL

1.1. Historique et généralités. — De nombreuses plantes contiennent un latex constitué par une émulsion de caoutchouc dans un sérum aqueux. Toutefois, seul un arbre originaire du Brésil, l'*Hevea brasiliensis,* se prête à une exploitation industrielle. L'intérêt pour cette « résine élastique » ne fut éveillé en Europe que vers 1740, par les deux Français La Condamine et Fresneau ; mais, telle quelle, elle était peu utilisable et il fallut deux découvertes complémentaires pour que l'industrie du caoutchouc prenne son essor : la *mastication* et la *vulcanisation*.

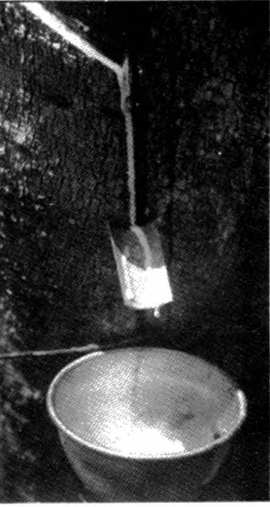
En 1819, l'industriel anglais Hancock montra qu'un traitement mécanique entre cylindres permettait de transformer le caoutchouc brut, élastique et résistant, en une masse pâteuse et plastique à laquelle il est possible non seulement de donner toutes les formes voulues, mais aussi d'incorporer des matières pulvérulentes en proportions notables. Mais les objets ainsi préparés s'altéraient très rapidement, et ce n'est qu'en 1839 que l'Américain Goodyear découvrit le remède recherché : la vulcanisation ; il constata que le chauffage avec du soufre rendait ses propriétés élastiques au produit et augmentait fortement sa résistance aux variations de température. Bien entendu, la technique de la vulcanisation a considérablement évolué depuis.

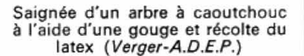
En ce qui concerne la *constitution chimique* du caoutchouc naturel, c'est après bien des recherches que fut montrée l'existence d'isoprène dans les produits de sa décomposition pyrogénée et qu'il fut établi que sa formule correspond à l'enchaînement de maillons isoprène en une longue chaîne filiforme de masse moléculaire très grande. En outre, la disposition de ces maillons est extrêmement régulière et toujours dans le même sens, ce qui assure une stéréorégularité à peu près parfaite de la macromolécule du polyisoprène naturel.

Au début, le caoutchouc fourni à l'industrie provenait des plantes exploitées dans leurs peuplements naturels et qui fournissaient le « caoutchouc sylvestre ». Mais cet approvisionnement devint rapidement insuffisant et l'idée de créer des plantations prit corps à la fin du siècle dernier. Elles se développèrent assez vite, principalement en Extrême-Orient, et l'accroissement de leur production fut très rapide : 100 000 t en 1911, un million en 1935, 2 millions en 1959 et près de 3 millions en 1970. Toutefois, même en se plaçant en dehors de considérations politiques ou économiques, cette production n'aurait pas suffi pour répondre aux besoins croissants de la consommation, pour laquelle l'appoint des caoutchoucs synthétiques est devenu indispensable dès la fin de la seconde guerre mondiale.

1.2. Récolte. Préparation classique. — Dans toutes les parties de l'hévéa se trouve un réseau de vaisseaux, les laticifères, qui communiquent entre eux et sont plus particulièrement denses dans l'écorce du tronc ; leurs parois sécrètent le latex, qui s'écoule pendant quelques heures quand on pratique, à l'aide d'une gouge, une incision dans l'écorce : c'est l'opération de la saignée. Le latex, recueilli dans des tasses, est ensuite ramassé et transporté dans une usine de traitement. Il peut être alors : soit simplement préservé de toute altération (le plus souvent par addition







Saignée d'un arbre à caoutchouc à l'aide d'une gouge et récolte du latex (*Verger-A.D.E.P.*)

d'ammoniaque) ou concentré (notamment par centrifugation), soit transformé en caoutchouc sec. Dans le premier cas il peut être livré aux utilisateurs sous forme liquide pour les fabrications faites directement à partir de latex.

La préparation classique consiste à filtrer le latex, à le diluer pour amener sa concentration, qui est naturellement de 30 à 40 %, à une valeur fixe (15 à 20 % selon les plantations), puis à le verser dans de grands bacs de coagulation où on le mélange soigneusement avec une solution d'agent coagulant (acide acétique ou acide formique). Les bacs sont munis de cloisonnements disposés en chicanes de façon que le coagulat puisse former un ruban continu, qui est ensuite essoré dans un train de laminoirs où il est à la fois pressé et lavé, puis coupé en feuilles. Après égouttage sur des étagères, ces dernières sont ensuite placées dans un séchoir-fumoir où la fumée imprègne les feuilles de substances créosotées qui les protègent contre l'oxydation et les moisissures. On a ainsi ce que l'on appelle la feuille fumée, qui représente la plus grande partie du caoutchouc sec en provenance des grandes plantations.

On prépare aussi du crêpe, crêpes pâles et crêpes bruns. Les premiers sont obtenus à partir du latex, en faisant passer le coagulat, sous courant d'eau, dans des crêpeuses, laminoirs à cylindres munis de cannelures qui assurent un lavage poussé ; quant aux crêpes bruns, ils sont préparés par broyage et lavage de diverses sortes de caoutchoucs « secondaires » provenant de la récolte et qui ont été plus ou moins pollués par des impuretés.

Le total des surfaces plantées dépasse actuellement 5 millions d'hectares. Les plus importants pays producteurs sont, de loin, la Malaisie et l'Indonésie. La rationalisation des techniques de saignée, l'application de la greffe et des méthodes agronomiques de sélection ont permis d'augmenter progressivement le rendement des arbres. Approximativement, on peut dire que ce rendement oscille autour de 500 kg par hectare et par an pour les plantations anciennes, atteint 1 000 - 1 500 kg pour des cultures plus récentes et dépasse même 2 000 kg dans certains cas. En outre, des recherches récentes sur la physiologie de l'hévéa ont conduit à une meilleure connaissance des facteurs qui influencent la production ; sur des cultures expérimentales, on a atteint des chiffres de 4 000 kg et plus, et il semble que cela soit encore loin du maximum possible.

1.3. Évolution de la préparation. — Pour les feuilles et les crêpes, une classification commerciale a été établie, basée sur des considérations d'apparence extérieure et de propreté ; mais ce classement est loin d'être en relation directe avec les propriétés intrinsèques du caoutchouc. C'est pourquoi on s'est orienté vers la vente sur spécifications techniques ; mais il est évident que, pour un marché aussi complexe que celui du caoutchouc naturel, cette évolution ne peut se faire que progressivement, en liaison avec tous les intéressés.

Le fait de ne plus avoir à tenir compte de l'aspect visuel permet d'utiliser des méthodes de préparation plus rationnelles et plus continues. Celles qui ont déjà donné lieu à des réalisations industrielles sont principalement basées sur une granulation du coagulat, qui conduit à un séchage plus rapide, le caoutchouc granulé étant ensuite pressé sous forme de blocs ; on peut faire cette granulation par découpage mécanique, ou bien en ajoutant au coagulat une petite proportion d'huile de ricin qui le fait s'émietter lorsqu'il passe entre des cylindres (type appelé Heveacrumb). Parallèlement, en vue de faciliter le passage de la classification commerciale à celle sur spécifications techniques, et à la suite d'initiatives prises par les planteurs français du Vietnam et du Cambodge, les producteurs de Malaisie ont établi un classement dit SMR (Standard Malaysian Rubber, ou caoutchouc standard de Malaisie) pour les types commerciaux. Le nombre de ces derniers a été réduit par élimination de certaines distinctions visuelles mineures et en tenant compte de spécifications simples qui comportent des limites fixées pour chaque catégorie.

1.4. Progrès techniques. — L'industrie du caoutchouc naturel s'est efforcée depuis longtemps de fournir aussi aux utilisateurs des types spéciaux répondant à certains besoins définis, mais c'est le développement des synthétiques qui a donné à cette tendance une impulsion nouvelle.

C'est ainsi qu'il existe, par exemple : des *caoutchoucs à mise en œuvre améliorée*, obtenus par addition de latex vulcanisé à du latex normal et qui présentent des avantages particuliers pour l'extrusion et le calandrage ; des *caoutchoucs à viscosité constante*, qui ont été traités chimiquement par une petite quantité de sels d'hydroxylamine et



Séchage de feuilles fumées (*Fort-Dunlop*)



Plantation d'hévéas en Bolivie (*Alain Froissardey-Atlas-Photo*)

ne donnent plus, au cours du stockage, de variations gênantes de plasticité; des *caoutchoucs à cristallisation retardée*, qui durcissent à plus basse température que les autres caoutchoucs.

Un autre point important est celui de l'*extension à l'huile*. Contrairement à ce qui avait été cru pendant longtemps, il est possible d'incorporer au caoutchouc naturel, tout comme il en est pour de nombreux synthétiques, des quantités relativement grandes de certaines huiles en obtenant des mélanges qui possèdent d'excellentes propriétés mécaniques. À la plantation on peut ajouter l'huile au latex et coaguler l'ensemble, ou encore préparer un mélange-maître par addition d'une proportion importante d'huile à du caoutchouc émietté. Mais jusqu'ici, pour des raisons pratiques, les efforts ont été surtout orientés vers l'introduction directe dans le caoutchouc sec, en mélangeur interne, à l'usine du consommateur.

Par ailleurs, des recherches ont pour but de réaliser des *modifications chimiques* du caoutchouc n'altérant pas sa haute élasticité, mais permettant de le doter de caractéristiques nouvelles. Il peut s'agir de la fixation de groupements réactifs ou bien de celle de chaînes latérales plus ou moins longues. Dans ce domaine, ce sont les travaux originaux de l'Institut Français du Caoutchouc qui ont amorcé le développement des multiples « polymères greffés » que l'on trouve actuellement, notamment dans l'industrie des plastiques. Il semble que cette voie puisse s'avérer particulièrement féconde pour adapter les propriétés physiques, mécaniques ou chimiques de tout élastomère aux nécessités de nouvelles applications.

Il y a lieu de mentionner que, le caoutchouc naturel ayant été pendant longtemps le seul produit connu à haute élasticité, c'est sur lui qu'a été faite la grande majorité des études fondamentales sur les caractéristiques chimiques et le comportement physique avant et après vulcanisation. Il en a été évidemment de même pour les travaux technologiques et les procédés de mise en œuvre, dont les principes ont été ensuite appliqués aux élastomères de synthèse en y apportant les modalités appropriées. Pour comprendre plus aisément les différences de propriétés et d'utilisation pratique entre le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques, il est donc nécessaire d'examiner d'abord les aspects technologiques de la mise en œuvre.

2. TECHNOLOGIE DU CAOUTCHOUC

Ce n'est que pour quelques applications particulières que le caoutchouc est employé sous sa forme crue; le plus souvent, les articles courants sont en caoutchouc vulcanisé. On a été ainsi amené à incorporer aux mélanges toutes sortes d'ingrédients, soit pour améliorer ou modifier certaines propriétés, soit pour faciliter les opérations de manufacture, soit pour diminuer le prix de revient.

2.1. Rôle et nature des ingrédients. — Après la découverte de la mastication, on s'aperçut que cette opération nécessite une importante consommation d'énergie et l'on s'efforça de la faciliter par l'addition de *plastifiants*.

On peut citer notamment les acides gras, le goudron de pin et, surtout, les plastifiants dérivés du pétrole qui peuvent être utilisés à doses relativement fortes sans inconvénients majeurs. Selon leur nature et leur masse moléculaire, les élastomères présentent des aptitudes différentes à la plastification.

La vulcanisation par le soufre seul exige un chauffage de plusieurs heures à des températures voisines de 140 °C; pour rendre l'opération plus rapide, on utilise des *accélérateurs*. Les plus actifs sont des composés organiques, appartenant principalement aux familles des thiazoles, des thiurames, des dithiocarbamates et des sulfénamides; ils forment une gamme très variée permettant d'opérer à la température et à la vitesse désirées. Le principe du mécanisme de la vulcanisation est la création de liaisons pontales entre les macromolécules, ce qui entraîne la constitution d'un réseau tridimensionnel empêchant que ces dernières glissent les unes sur les autres et assurant ainsi la permanence des caractéristiques d'élasticité et de stabilité de forme. Ces liaisons intermoléculaires peuvent être obtenues à l'aide d'autres *agents vulcanisants* que le soufre; bien que ce dernier reste de loin le plus employé dans la pratique, dans certains cas on fait également appel à des systèmes libérant du soufre, à des peroxydes organiques tels ceux de benzoyle ou de dicumyle, ou encore, depuis peu, aux rayonnements ionisants.

Le caoutchouc naturel, ainsi que de nombreux autres élastomères, est sujet au phénomène de *vieillissement* qui

se manifeste par une modification progressive des propriétés du vulcanisat. Selon les cas, cela se traduit par un ramollissement ou par un durcissement rendant l'article inutilisable. Ce vieillissement est dû principalement à l'action de l'oxygène et, pour le combattre, on ajoute aux mélanges des produits appelés antioxygènes qui retardent la vitesse d'oxydation ; ce sont essentiellement des phénols et des amines, et surtout des composés de condensation de ces dernières avec d'autres corps. On utilise aussi, lorsqu'il y a lieu, des agents qui assurent une protection spécifique contre les effets nuisibles d'autres facteurs de dégradation, tels que les métaux « poisons » (cuivre, manganèse, etc.), la chaleur, la lumière, l'ozone.

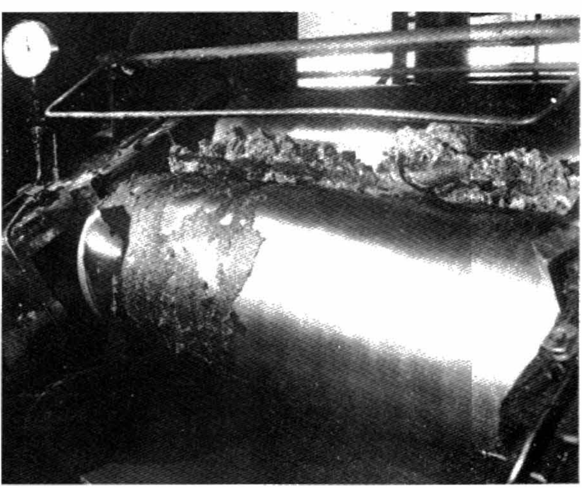
Par ailleurs, le plus souvent, certaines des propriétés mécaniques des vulcanisats constitués simplement de caoutchouc et d'un système de vulcanisation (ce que l'on appelle un vulcanisat « pure gomme ») ne sont pas suffisantes pour que l'objet satisfasse convenablement à l'utilisation envisagée ; c'est le cas, notamment, des résistances au déchirement et à l'abrasion. Les *charges* dites renforçantes ont pour effet d'améliorer ces caractéristiques ; sans ce renforcement, divers caoutchoucs synthétiques seraient inutilisables. Le type de ces charges renforçantes est le noir de carbone, fabriqué par combustion incomplète ou par craquage de gaz naturels ou de fractions résiduelles du traitement du pétrole ; il existe aussi des charges renforçantes blanches, les plus actives étant des silices ultrafines. Quant aux charges inertes, la craie par exemple, ce sont des produits que l'on peut incorporer aux mélanges sans trop abaisser leurs propriétés mécaniques et qui permettent ainsi de diminuer le prix de revient des articles dont on n'exige pas des qualités supérieures.

Ces familles d'ingrédients interviennent presque obligatoirement dans la composition d'un mélange, mais de nombreuses autres peuvent être également appelées à jouer un rôle : pigments pour la coloration, agents d'expansion libérant des gaz pour l'obtention de caoutchoucs cellulaires ou spongieux, ignifugeants pour réduire la combustibilité, etc.

Le choix de la nature et de la proportion des constituants d'un mélange devant posséder un ensemble de propriétés déterminées représente donc un problème complexe ; en outre, ce qui favorise l'une de ces propriétés peut souvent nuire aux autres, de sorte que l'on doit rechercher des solutions de compromis. Enfin, il faut aussi tenir compte des opérations industrielles indispensables pour la fabrication et dont les conditions peuvent se trouver en antagonisme avec l'établissement de la formulation conférant les caractéristiques idéales. Il n'est donc pas étonnant que d'importants travaux soient consacrés, depuis quelques années, à l'utilisation des ordinateurs dans ce domaine.

2.2. Les opérations industrielles. — Il faut d'abord plastifier le caoutchouc, afin de faciliter l'introduction des ingrédients et la mise en forme. On réalise cette plastification par *malaxage* dans des appareils dits malaxeurs (ou mélangeurs, car ils servent également aux opérations de mélangeage). Ce peuvent être des malaxeurs à cylindres, constitués par deux cylindres métalliques, parallèles et horizontaux, à écartement variable, tournant en sens inverses à des vitesses différentes pour obtenir une friction. En faisant circuler de la vapeur ou de l'eau à l'intérieur des cylindres, il est possible de les chauffer ou de les refroidir. Une fois atteint un degré de plastification suffisant (que possèdent déjà initialement certains élastomères étendus à l'huile), le caoutchouc donne une feuille continue sur le cylindre avant ; l'écartement des cylindres est réglé de telle sorte qu'une partie du caoutchouc forme un « bourrelet » où la matière se trouve constamment renouvelée et « en travail ». Vient ensuite la phase de *mélangeage* : les ingrédients sont versés sur le caoutchouc plastifié et l'on facilite l'homogénéisation du mélange en coupant latéralement des portions de la feuille et en les rabattant de l'autre côté. Malaxage et mélangeage se font également, de façon plus automatique et plus rapide, et en opérant sur des quantités plus importantes, dans des mélangeurs internes, sortes de pétrins à l'intérieur desquels tournent en sens inverses deux axes munis de palettes profilées.

Le mélange ainsi obtenu peut être tout simplement placé dans un moule de forme appropriée, que l'on chauffe en le



Malaxeur à cylindres (*Photothèque I.F.C.*)

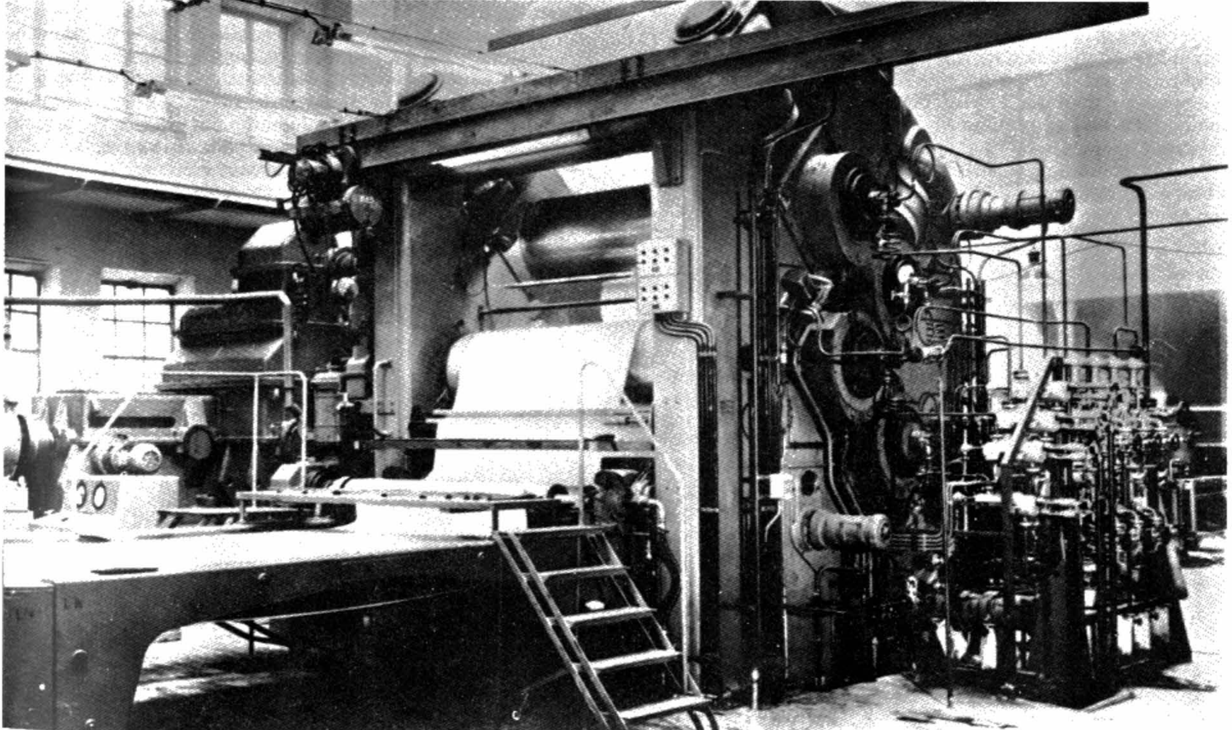


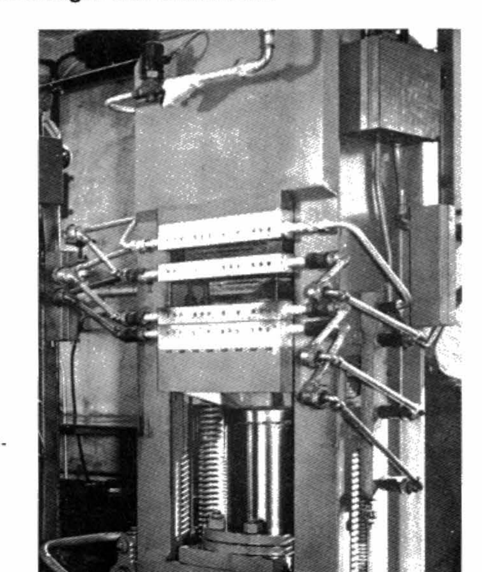
Mélangeur à cylindres placé sous l'ouverture d'un mélangeur interne. Il reçoit la masse de mélange (en haut à droite) pour l'homogénéiser en même temps qu'on ajoutera certains ingrédients (notamment des accélérateurs) et pour le mettre en feuilles (*Fort-Dunlop*)

Mélangeur interne
(*Repiquet*)

Extrudeuse-dégazeuse
(*Andouart*)

Calandre avec réglage automatique
(*Photothèque-I.F.C.*)





Presse à vulcaniser à plateaux chauffants (*Photothèque-I.F.C.*)

maintenant serré entre les plateaux d'une presse pendant le temps nécessaire à la vulcanisation. Mais, pour de nombreuses fabrications, avant de procéder à la vulcanisation, il faut effectuer une *mise en forme*. Le plus souvent, il s'agit : soit de faire une feuille d'épaisseur bien uniforme, adhérant ou non à un tissu, ce que l'on réalise à l'aide d'une calandre, comportant plusieurs cylindres parallèles superposés (au nombre de 3 ou 4 en général) ; soit de préparer un profilé en faisant passer le mélange à travers une filière placée à la sortie d'une extrudeuse à vis. Par ailleurs, de nombreux articles en caoutchouc comportent une armature en textile et leur fabrication exige donc diverses opérations de confection ; un exemple caractéristique est celui des enveloppes de pneumatiques, qui se composent d'un certain nombre de plis de tissu gommé, assemblés les uns sur les autres sur un tambour, l'ensemble étant ensuite protégé par une couche de caoutchouc et muni d'une bande de roulement, le tout se trouvant finalement uni par la vulcanisation.

Pour effectuer la *vulcanisation*, on utilise, en dehors des presses à plateaux chauffants : des presses en autoclave, des étuves à air chaud, des autoclaves où l'on peut opérer en atmosphère de vapeur, etc. L'appareillage d'une usine de traitement du caoutchouc comprend encore bien d'autres machines, nombreuses et variées, telles que : métiers à gommer, calandres-profileuses, presses spéciales pour courroies et tapis, moules individuels pour pneumatiques, dispositifs pour finissage et ébarbage, etc. Mais il est important de noter la tendance à rendre les opérations aussi automatiques et continues que possible. Par exemple, on peut, à l'aide de courroies transporteuses, convoyeurs pneumatiques et balances automatiques, alimenter un premier mélangeur interne où l'on prépare un mélange-maître de caoutchouc et de noir de carbone qui passe dans un appareil où il est découpé en petits morceaux ; ces derniers sont introduits, en même temps que les autres ingrédients, dans un second mélangeur à la sortie duquel une extrudeuse donne le mélange sous forme d'une feuille continue. On fabrique aussi des mélangeurs analogues à des extrudeuses, mais dont la vis et le corps sont de conception telle que la matière se trouve soumise à de puissants efforts de cisaillement qui assurent le mélangeage et le réchauffage.

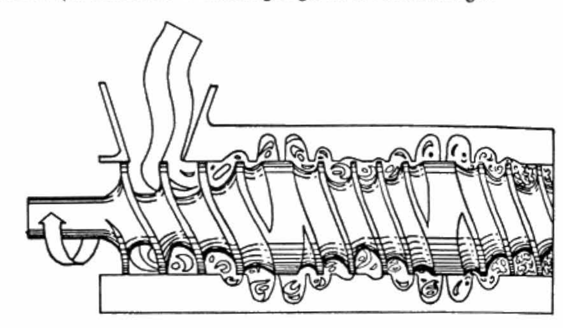
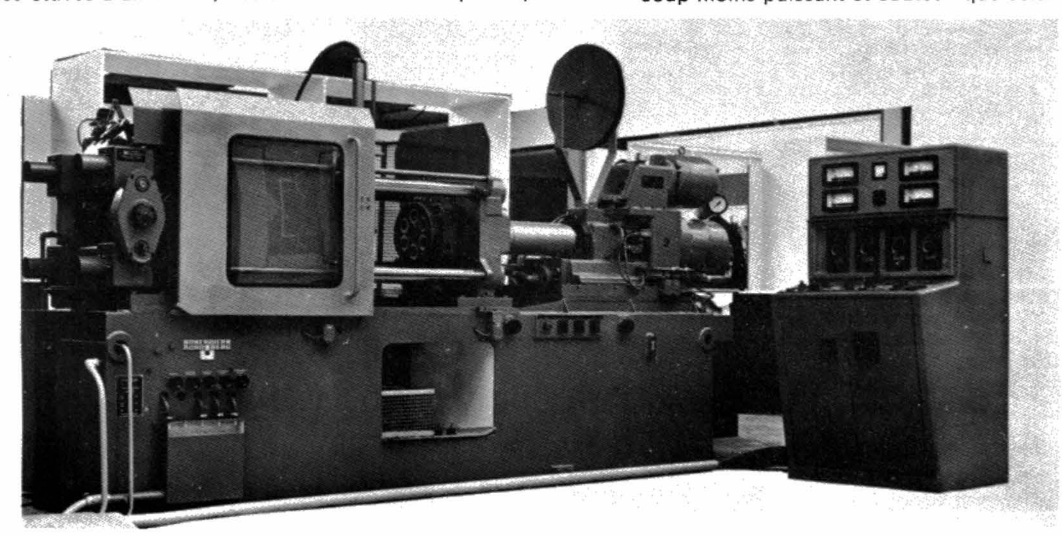


Schéma du principe de fonctionnement d'un mélangeur par extrusion : les variations du filet de la vis et des cavités creusées dans le cylindre assurent les puissants efforts de cisaillement nécessaires

Pour la vulcanisation, la manipulation des moules peut se faire avec des dispositifs automatiques d'ouverture et au moyen de chemins de roulement. Lorsqu'il s'agit d'objets d'une certaine longueur, comme des courroies, des câbles électriques, des profilés, on peut réaliser l'opération véritablement en continu à l'aide de dispositifs spéciaux : série de tambours chauffants, bain de sels fondus, lit fluidisé, appareils de chauffage par micro-ondes (V. t. 2, Électrothermie, chap. 4 § 5), etc. En vue d'augmenter la rapidité du moulage, on applique aussi aux élastomères le procédé de moulage par injection qui est très répandu pour les plastiques.

2.3. Les emplois directs du latex. — Pour certaines fabrications, on peut utiliser directement le latex. Cette technique présente des avantages : du point de vue de la qualité des articles obtenus, puisque le caoutchouc ne subit aucune dégradation, et parce que le matériel nécessaire est beaucoup moins puissant et coûteux que celui exigé par le trai-



Machine pour moulage par injection (*Ankerwerk*)



Démoulage d'oreillers en mousse de latex (*Photothèque-I.F.C.*)

tement du caoutchouc sec. Mais elle a aussi des inconvénients, notamment le prix du transport et la difficulté d'élimination complète de l'eau lorsqu'il s'agit d'articles épais.

Pour préparer les mélanges, on ajoute les ingrédients sous forme de dispersions aqueuses très fines. Ils appartiennent aux mêmes familles que celles précédemment décrites, mais comportent aussi des catégories spéciales, destinées à assurer la stabilité de l'émulsion au cours des opérations et à faciliter certains traitements de mise en œuvre : agents dispersants, stabilisants, épaississants, mouillants, produits pour la coagulation ou la gélification, etc. Les principaux procédés employés sont : le trempage, le gommage et l'imprégnation de textiles ou autres matériaux, l'électrodéposition, le moulage (par gélification pour des objets pleins, par gélification en moules rotatifs ou coulée dans des moules en plâtre pour des objets creux) ; les fils de caoutchouc sont fabriqués en continu par passage du mélange de latex dans des filières débouchant dans un bain coagulant.

Mais le domaine où le latex a trouvé sa plus large application est certainement celui des articles alvéolaires : matelas, oreillers, garnitures de sièges, etc. en mousse de latex. Le procédé le plus employé consiste à battre le latex avec de l'air, à gélifier la mousse dans des moules, puis à la vulcaniser et la sécher.

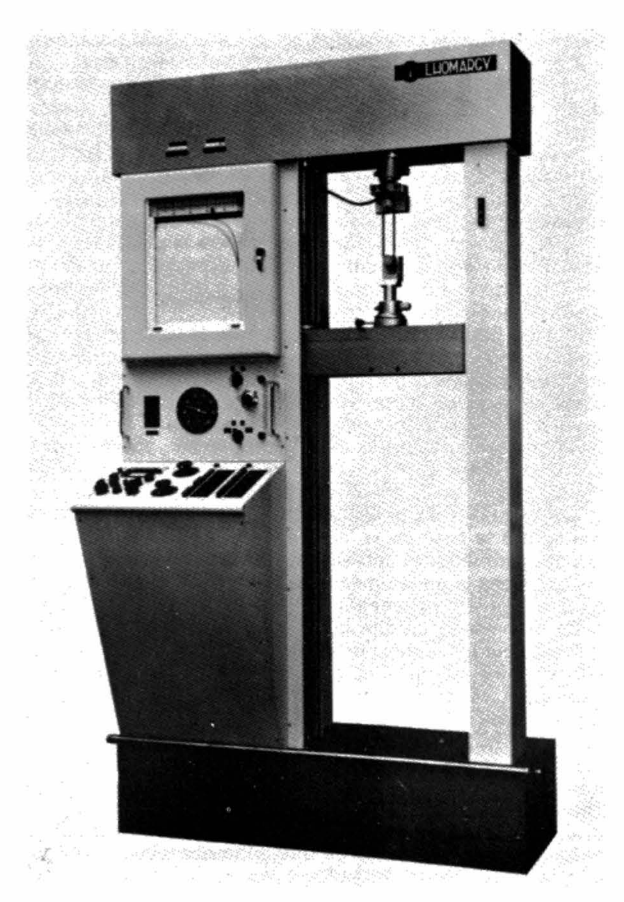
2.4. Les essais du caoutchouc. — Pour le contrôle des matières premières, latex et caoutchouc sec, on procède à diverses déterminations, notamment : pour le premier, teneur en caoutchouc, teneur en agent de stabilisation, stabilité mécanique, stabilité chimique ; pour le second, teneur en impuretés, consistance (généralement mesurée à l'aide de l'appareil Mooney), vitesse de vulcanisation d'un mélange de formule normalisée.

Sur les mélanges industriels non encore vulcanisés, on contrôle les caractéristiques importantes pour la mise en œuvre et les propriétés finales, telles que consistance, reprise élastique, temps de grillage (durée pendant laquelle un mélange peut supporter les températures de mise en œuvre sans présenter de début de vulcanisation), durée de cuisson optimale.

Pour la mise au point d'un vulcanisat, on est amené à effectuer de nombreux essais, principalement mécaniques : dureté, essais dynamométriques (courbe tension-allongement, cycles d'hystérésis, résistance au déchirement), déformation rémanente après traction ou compression, résilience, échauffement interne, résistance aux flexions répétées, résistance à l'abrasion, comportement à basses et à hautes températures, etc. Afin d'avoir une idée de l'évolution dans le temps des propriétés des vulcanisats, on fait également des mesures de vieillissement artificiel permettant d'évaluer la résistance aux divers agents de dégradation : oxygène, ozone, chaleur, lumière, intempéries.

Par ailleurs, des essais « de service » sont souvent nécessaires, notamment pour les articles comportant des métaux ou des textiles en les soumettant à des contraintes voisines de celles d'utilisation. Les pneumatiques en sont un exemple caractéristique : ils font l'objet d'essais très variés sur machines spéciales et sur circuits routiers.

Enfin, l'analyse d'un vulcanisat requiert la détermination qualitative et quantitative des ingrédients (en faisant appel à la chromatographie pour ceux introduits à petites doses), ainsi que celle des élastomères utilisés, qui a nécessité la mise au point de méthodes appropriées.



Dynamomètre électronique (*Lhomargy*)

2.5. Régénéré. Ébonite. Gutta-percha. — Le problème de la réutilisation des déchets de fabrication et des articles usagés a conduit à l'emploi de procédés de *régénération* (à la soude, à la vapeur, par traitements mécaniques, etc.) : le caoutchouc se trouve ramené à un état plastique et peut être vulcanisé à nouveau. Ce régénéré a des propriétés nettement inférieures à celles du caoutchouc neuf, mais son addition à certains mélanges permet d'abaisser le prix de revient d'articles pour lesquels on peut se contenter de qualités moyennes.

L'*ébonite* est la forme durcie du caoutchouc, obtenue par vulcanisation complète à l'aide d'une forte proportion de soufre. Malgré certaines caractéristiques remarquables, notamment sa résistance aux attaques chimiques, elle tend de plus en plus à être remplacée par des résines synthétiques.

Il y a aussi lieu de mentionner la *gutta-percha*, fournie par des arbres de la famille des sapotacées, qui est l'isomère trans-naturel de l'hydrocarbure caoutchouc et a été longtemps utilisée pour la fabrication de récipients devant résister aux acides, même à l'acide fluorhydrique, et pour la confection de câbles sous-marins.

3. CAOUTCHOUCS SYNTHÉTIQUES

3.1. Historique et généralités. — C'est le Français G. Bouchardat qui montra, en 1879, la possibilité de convertir l'isoprène, isolé des produits de distillation du caoutchouc, en une masse solide analogue au caoutchouc et réalisa ainsi la première synthèse. Un nouveau pas en avant fut effectué en 1884 par Tilden qui obtint de l'isoprène par décomposition de l'essence de térébenthine. Puis, dans la période 1900-1910, d'autres chercheurs découvrirent la propriété de divers homologues de l'isoprène, notamment le butadiène, de donner également des produits semblables au caoutchouc par polymérisation sous l'action de la chaleur.

Les techniciens se trouvaient donc en possession d'études de laboratoire leur permettant d'attaquer la fabrication du caoutchouc synthétique sur le plan industriel. En effet, une telle production était encouragée à cette époque par la forte demande en caoutchouc due au développement commercial de l'automobile, et alors que les plantations n'en étaient qu'à leur début. Cependant, ce fut seulement sous l'empire de la nécessité, au cours de la guerre 1914-1918, que fut réalisée la première synthèse véritablement industrielle d'un élastomère : l'Allemagne, isolée par le blocus, fabriqua un polymère de diméthylbutadiène (ou méthyl-isoprène) appelé méthylcaoutchouc. Mais ce produit ne pouvait lutter, ni par son prix, ni par sa qualité, avec le caoutchouc naturel, et sa production fut arrêtée après la guerre. Les recherches se poursuivirent : elles portèrent principalement, en Allemagne, sur la copolymérisation du butadiène avec d'autres monomères et conduisirent à l'obtention des *Bunas* (Bu pour butadiène et Na pour sodium, le catalyseur utilisé étant le sodium métallique). La fabrication du copolymère avec le styrène, ou Buna S, fit l'objet d'améliorations successives et se développa d'autant plus rapidement qu'elle fut favorisée par la seconde guerre mondiale et ses séquelles. Depuis, de nombreux autres types de caoutchoucs synthétiques ont été mis au point. Leur production totale, dépasse largement celle du caoutchouc naturel.

Les réactions de polymérisation et de copolymérisation qui sont à la base de la fabrication des principaux caoutchoucs synthétiques actuels peuvent être réalisées, suivant les cas, dans la masse même du monomère, ou en solution dans un solvant convenable, ou encore en émulsion ; c'est cette dernière technique qui a été jusqu'à présent la plus utilisée pour les fabrications les plus importantes. En ce qui concerne les monomères, c'est à partir des produits pétroliers qu'on les obtient, dans la grande majorité des cas, de la façon la plus économique. Il est également possible de préparer des élastomères par des réactions de polycondensation.

Au sujet de la structure moléculaire, il est à noter que, contrairement à ce qui a lieu dans la biosynthèse du caoutchouc naturel, la polymérisation chimique a tendance à donner des arrangements variés conduisant à une structure irrégulière, ce qui peut avoir une influence défavorable sur certaines propriétés technologiques importantes. Il a fallu de longues recherches pour parvenir à domestiquer ces réactions parasites, notamment grâce à l'emploi de catalyseurs spéciaux, dits « stéréospécifiques ».

Les produits élastiques de synthèse peuvent être classés chimiquement en trois groupes : polymères et copolymères de dioléfines, polymères et copolymères de monooléfines, produits de polycondensation. Mais, du point du vue pratique, on distingue deux grandes catégories : les élastomères pour usage général, c'est-à-dire ceux qui peuvent servir pour les applications les plus importantes, dont le pneumatique, et les élastomères pour usages spéciaux, qui se recommandent pour certaines utilisations en raison de propriétés particulières, telles que résistance aux solvants et aux huiles, aux agents de vieillissement, etc.

L'industrie du caoutchouc emploie également divers hauts polymères qui ne sont pas des élastomères, mais appartiennent à la famille des plastiques, notamment le polychlorure de vinyle et le polyéthylène.



Grands réacteurs de polymérisation que l'on alimente en butadiène, styrène, solution de savon, agents catalytiques et autres produits chimiques pour produire un latex SBR

3.2. Élastomères pour usage général. — Ce groupe comporte actuellement, à côté du caoutchouc naturel, les copolymères butadiène-styrène, les polyisoprènes et les polybutadiènes.

Les *copolymères butadiène-styrène*, appelés au début Buna S, sont maintenant désignés par l'abréviation SBR, initiales des mots anglais Styrene, Butadiene et Rubber (caoutchouc). Le SBR est, de loin, le caoutchouc synthétique dont la production est la plus importante (2 800 000 t en 1970) ; il est généralement préparé en émulsion, avec une teneur en styrène combiné qui est le plus souvent d'environ 25 %.

Il en existe de nombreuses variétés, distinguées à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres, les deux premiers correspondant à une série déterminée et les deux suivants aux types de la série. La série 1 000 est celle des SBR « chauds », polymérisés à 50 °C, la série 1 500 celle des SBR « froids », polymérisés à 5 °C avec un système catalytique plus actif ; ces derniers ont une structure plus linéaire et, dans l'ensemble, présentent des caractéristiques supérieures. Les autres séries désignent les latex ou des catégories spéciales, telles que des mélanges-maîtres contenant du noir

de carbone ou de l'huile (ou les deux), destinées à faciliter le travail du manufacturier. Ce dernier dispose ainsi d'une gamme de produits parmi lesquels il peut choisir celui qui convient le mieux à une fabrication déterminée ; c'est là un caractère de l'industrie des caoutchoucs synthétiques, qui cherche à préparer ses produits « sur mesure ». Depuis quelques années, on fabrique aussi des SBR par polymérisation en solution ; en modifiant les conditions opératoires, cela permet d'agir plus facilement sur la structure de la chaîne et sur l'ordonnancement des maillons.

En ce qui concerne les propriétés technologiques, elles sont souvent assez proches de celles du caoutchouc naturel, mais seulement si l'on compare des mélanges contenant des charges renforçantes. En effet, le SBR ne possède pas la propriété qu'a le caoutchouc naturel de cristalliser partiellement sous l'effet d'un étirement, ce qui entraîne un autorenforcement et permet l'obtention d'articles pure gomme ayant de bonnes caractéristiques mécaniques. Par ailleurs, si le SBR convient pour les pneus « tourisme », le caoutchouc naturel garde sa prééminence pour les pneus de poids lourds et d'avions, en raison du plus faible échauffement de la bande de roulement en cours d'utilisation.

Le premier *polyisoprène* de synthèse reproduisant assez exactement la structure dite cis-1-4 du caoutchouc naturel fut obtenu en 1965 par polymérisation de l'isoprène en solution, en utilisant le lithium comme catalyseur. Quelques mois après, l'emploi des catalyseurs stéréospécifiques conduisit à une structure encore plus régulière. En fait, ce polyisoprène est le seul élastomère de synthèse que l'on devrait, logiquement, appeler caoutchouc synthétique, les autres, dont la constitution chimique est différente, n'étant que des caoutchoucs « artificiels ». À part quelques différences mineures, ces polysioprènes jouissent évidemment de propriétés d'autant plus voisines de celles du caoutchouc naturel que leur teneur en cis-1-4 est plus grande (V. t. 3, Plastiques). Toutefois, leur fabrication est encore relativement peu importante, ce qui semble tenir surtout à une question de prix de revient.

Les *polybutadiènes*, fabriqués eux aussi par catalyse stéréospécifique, se sont davantage développés, du fait qu'il existait déjà des installations de préparation de butadiène, produit moins coûteux que l'isoprène, et que leurs propriétés se différencient nettement de celles du caoutchouc naturel. Ils possèdent, notamment, d'excellentes caractéristiques de résilience et de résistance à l'abrasion ; mais on a constaté certains inconvénients pour leur emploi dans les pneumatiques, en particulier une fâcheuse tendance au dérapage sur sols mouillés. Aussi les utilise-t-on surtout en association avec du SBR ou du caoutchouc naturel, en obtenant ainsi une conjugaison fort intéressante de propriétés.

De plus, il importe de mentionner deux développements récents : le début de la fabrication industrielle de copolymères de butadiène avec du styrène ou de l'isoprène à l'aide de catalyseurs « alfin » ; l'apparition d'un nouvel élastomère, le 1-5-trans-polypenténamer, obtenu par polymérisation du cyclopentène avec ouverture de cycle et qui semble présenter les caractéristiques désirables pour un caoutchouc à usage général.

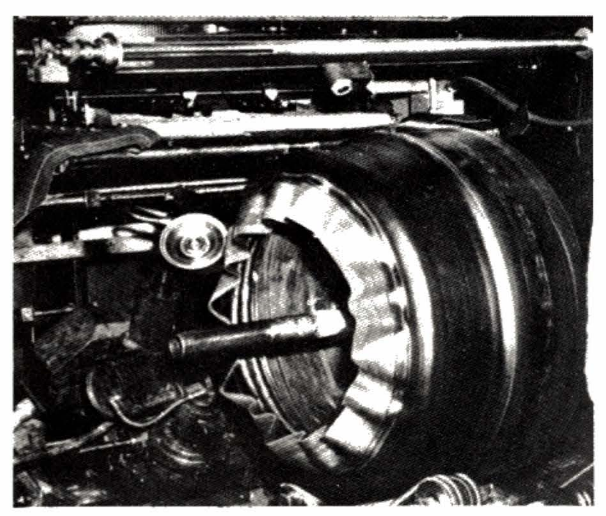
3.3. Élastomères pour usages spéciaux. — Parmi les nombreuses familles de ce groupe, deux d'entre elles font l'objet de travaux en vue de leur emploi dans les pneumatiques : celle des butylcaoutchoucs et celle des caoutchoucs d'éthylène-propylène.

Le *butylcaoutchouc* est obtenu par copolymérisation d'isobutylène avec une petite proportion d'isoprène, ce qui donne un produit à insaturation faible mais suffisante pour permettre la vulcanisation. Les vulcanisats se caractérisent par leur inertie chimique et, surtout, par leur excellente imperméabilité aux gaz qui a fait adopter cet élastomère pour la fabrication des chambres à air.

Dans des conditions convenables, la copolymérisation d'*éthylène et de propylène* fournit des élastomères saturés qui peuvent être rétifiés par des peroxydes, Mais ce mode de vulcanisation présente divers inconvénients et l'on prépare surtout maintenant des terpolymères par addition, en petite quantité, d'un troisième monomère, de préférence une dioléfine non conjuguée, qui permet l'emploi de systèmes soufre-accélérateur. Ils sont désignés par le sigle EPDM. Comme le SBR, ils nécessitent l'incorporation de charges renforçantes. Ils se prêtent remarquablement bien à l'extension par des huiles et des charges, et leurs propriétés de résistance à la chaleur, à l'ozone, aux intempéries, etc., les font utiliser pour de nombreuses applications.

Deux autres familles d'élastomères spéciaux ont une production relativement importante : le *caoutchouc nitrile* et le *caoutchouc de chloroprène*. Le premier est un copolymère de butadiène et de nitrile acrylique, préparé par les mêmes procédés que le SBR ; il existe en types chauds et froids, à diverses teneurs en nitrile. Son excellente résistance à l'essence et aux huiles est à la base de ses applications techniques. Le caoutchouc de chloroprène correspond, en principe, à la polymérisation en émulsion du chloroprène ; on en fabrique de nombreuses variantes, différant par leurs caractéristiques (par exemple, leur tendance à la cristallisation à température ordinaire), certaines d'entre elles étant d'ailleurs des copolymères. Leur vulcanisation est particulière et peut être réalisée par simple chauffage en présence d'oxydes métalliques, notamment de zinc et de magnésium. Ces élastomères ont trouvé de larges emplois en raison de leur bonne résistance aux divers types de vieillissement, aux huiles dans lesquelles ils gonflent peu, et à la propagation de la flamme en raison de leur teneur en chlore.

Les autres types d'élastomères spéciaux, fabriqués à moindre échelle, se recommandent par des caractéristiques particulières qui les font utiliser en dépit d'un prix parfois fort élevé. Trois d'entre eux sont préparés par polycondensation. Les *polysulfures organiques* ou thioplastes, obtenus à partir de dihalogénures aliphatiques et polysulfures alcalins, n'ont que des propriétés mécaniques faibles, mais résistent aux solvants, aussi bien aromatiques qu'aliphatiques, et présentent un très bon vieillissement et une grande imperméabilité aux gaz. Les *caoutchoucs de silicone* résultent de la polycondensation de dialcoylsiloxanes, avec diverses variantes, et présentent la caractéristique remarquable de conserver leur élasticité jusqu'à des températures de — 80 °C et de rester stables jusqu'à + 300 °C environ.

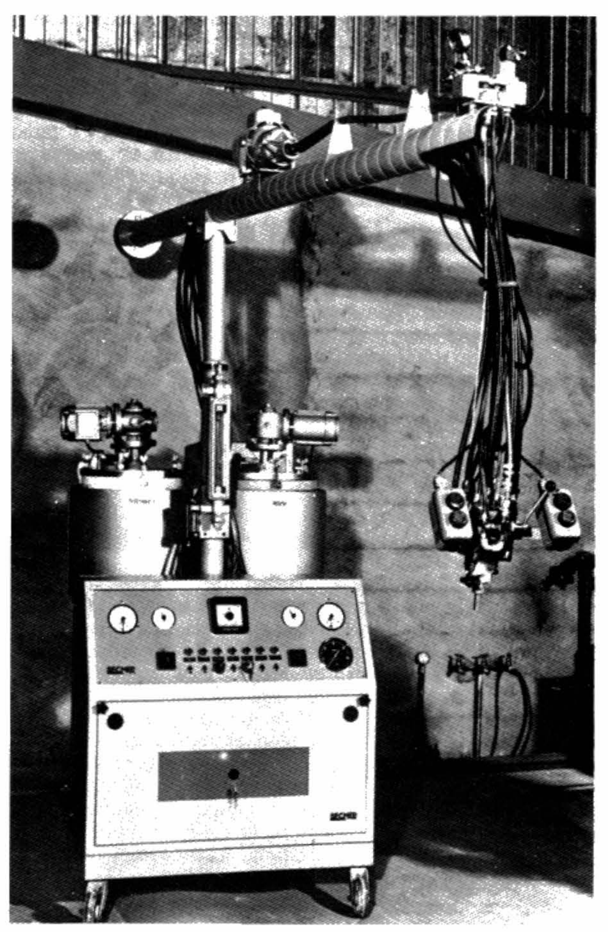


Confection d'un pneumatique sur tambour (*Photothèque-I.F.C.*)

L'obtention des *caoutchoucs de polyuréthanne* implique la préparation d'un polyester ou d'un polyéther, puis sa réaction par polyaddition avec un diisocyanate ; leur mise en œuvre, par la méthode dite des « prépolymères », exige un appareillage spécial, et leur mode de vulcanisation est tout à fait particulier ; mais il existe aussi des types malaxables qui se travaillent selon les techniques habituelles de l'industrie du caoutchouc. Ils ont trouvé d'intéressantes applications : bandages de véhicules, talons de chaussures, nombreuses pièces mécaniques, etc., et se prêtent bien à la fabrication de mousses, flexibles ou rigides.

Il faut mentionner encore :

- les *élastomères fluorés*, tel le copolymère de perfluoropropylène et de fluorure de vinylidène, qui sont pratiquement



Machine pour mise en œuvre des polyuréthannes montrant deux réservoirs pour la résine et l'isocyanate (*O. Battanchon-Secmer*)

insensibles à de nombreux agents dégradants et conservent leurs propriétés mécaniques jusqu'à plus de 200 °C ;

- les polyéthylènes chlorosulfonés, ou Hypalons ;
- les caoutchoucs polyacryliques ;
- les caoutchoucs de polyéthers, notamment ceux obtenus à partir d'oxyde de propylène ou d'épichlorhydrine ;
- les caoutchoucs carboxyliques, qui sont des terpolymères de butadiène-styrène ou de butadiène-nitrile acrylique avec de l'acide acrylique ou méthacrylique.

De nombreux autres types sont en cours de développement ou à l'étude.

Une catégorie particulière est celle des *caoutchoucs thermoplastiques* qui peuvent être utilisés sans qu'il soit nécessaire de les vulcaniser et peuvent donc être mis en œuvre comme les plastiques. Ce sont des copolymères constitués de trois longues séquences : l'une, centrale, élastomérique (polybutadiène), et les deux autres, terminales, non élastomériques (polystyrène). Ces portions rigides jouent le rôle de liaisons pontales physiques, mais ces produits reprennent évidemment leur plasticité quand la température dépasse environ 60 °C.

Par ailleurs, il est important de noter la tendance à employer des *polymères liquides* pouvant être coulés directement dans des moules après mélange avec les autres composants. Ce sont des produits à bas poids moléculaire, dits « téléchéliques » parce qu'ils possèdent des extrémités réactives permettant l'allongement de la chaîne de la macromolécule par chauffage. Des travaux visent à l'application de techniques de ce genre, même pour la fabrication des pneumatiques, ce qui entraînerait des simplifications considérables de l'appareillage.

3.4. Notions sur la fabrication industrielle. — Les méthodes de fabrication des caoutchoucs synthétiques varient, bien entendu, selon les catégories. Mais on peut prendre comme exemple celle du SBR froid. On prépare une émulsion en phase aqueuse, en présence d'un émulsifiant, le plus souvent savon d'acide gras. Puis on ajoute un catalyseur et un modificateur de chaîne, lequel favorise la formation de chaînes linéaires de longueurs convenables. La polymérisation se fait en continu dans une série de réacteurs maintenus à 5 °C. Lorsque le taux de conversion désiré est atteint, on introduit des substances qui permettent de stopper la réaction et de stabiliser le produit obtenu. Le butadiène et le styrène qui n'ont pas réagi sont récupérés, le premier par application d'un vide partiel, le second par entraînement à la vapeur.

Si l'on veut préparer des mélanges-maîtres à l'huile ou au noir, on ajoute alors ces produits au latex, et la coagulation est réalisée en faisant tomber dans le courant de latex les quantités voulues d'agents coagulants (par exemple, solution de chlorure de sodium et acide sulfurique dilué) de façon à obtenir des grumeaux. Ces derniers, après filtration et lavage, sont séchés dans une étuve à air chaud, par circulation sur bandes transporteuses. Enfin, à l'aide de presses, les miettes sont comprimées en balles de 36 kg environ et empaquetées dans des sacs en papier fort.

Quelques propriétés comparées des principaux élastomères

Propriété	Caoutchouc naturel	SBR	Polybutadiène	Butyl-caoutchouc	Caoutchouc d'éthylène-propylène	Caoutchouc nitrile	Caoutchouc de chloroprène
Résistance à la rupture (décanewtons par centimètre carré)							
pure gomme	200-250	15-20	20-70	200-220	25-30	35-65	200-250
renforcé au noir	250-320	200-250	150-210	200-220	200-240	200-250	200-250
Rebondissement							
à température ordinaire	excellent	bon	excellent	mauvais	bon	bon	très bon
à chaud	excellent	bon	excellent	très bon	bon	bon	très bon
Résistance au déchirement	excellente	moyenne	moyenne	bonne	moyenne	bonne	moyenne
Résistance aux agents de dégradation	bonne	bonne	bonne	excellente	excellente	bonne	excellente
Résistance aux solvants							
aliphatiques	mauvaise	mauvaise	mauvaise	mauvaise	mauvaise	excellente	bonne
aromatiques	mauvaise	mauvaise	mauvaise	mauvaise	mauvaise	bonne	moyenne
Perméabilité aux gaz	faible	faible	faible	très faible	faible	faible	faible
Domaine de températures d'emploi (degrés Celsius)	— 50, + 80	— 30, + 80	— 70, + 90	—45, +150	— 50, +150	—50, +120	—40, +115

Formules chimiques de monomères et élastomères

	Monomères		*Élastomères*
Isoprène	$CH_2=C(CH_3)-CH=CH_2$	Caoutchouc naturel / Polyisoprène	$[CH_2-C(CH_3)=CH-CH_2]_n$
Butadiène	$CH_2=CH-CH=CH_2$	Polybutadiène	$[CH_2-CH=CH-CH_2]_n$
Styrène	$CH_2=CH-C_6H_5$	SBR	$[CH_2-CH=CH-CH_2]_x[CH_2-CH(C_6H_5)]_y$
Éthylène Propylène	$CH_2=CH_2$ $CH_3-CH=CH_2$	Copolymères éthylène-propylène	$[CH_2-CH_2]_x[CH(CH_3)-CH_2]_y$
Isobutylène	$CH_2=C(CH_3)_2$	Butylcaoutchouc	$[CH_2-C(CH_3)_2]_x[CH_2-C(CH_3)=CH-CH_2]_y$
Chloroprène	$CH_2-C(Cl)-CH=CH_2$	Polychloroprène	$[CH_2-C(Cl)=CH-CH_2]_n$
Nitrile acrylique	$CH_2=CH-CN$	Caoutchouc nitrile	$[CH_2-CH=CH-CH_2]_x[CH_2-CH(CN)]_y$
Cyclopentadiène	$CH=CH$ CH_2 CH_2 CH_2	Trans-polypenténamer	$[CH_2-CH_2-CH_2-CH=CH]_n$

Exemples de catalyseurs

- Catalyseur stéréospécifique : aluminium triéthyle + tétrachlorure de titane.
- Catalyseur alfin : isopropoxyde de sodium + allyl-sodium + chlorure de sodium.

4. ASPECTS ÉCONOMIQUES

Les productions respectives de caoutchouc naturel et de caoutchoucs synthétiques ont été, en 1970, de 2 900 000 et 4 700 000 t, soit un total de 7 600 000 t, et il est prévu qu'il dépassera 8 000 000 t en 1975. Encore ces chiffres ne tiennent-ils pas compte de la production des nations de l'Europe de l'Est, estimée à environ 1 500 000 t. Les pays où l'*industrie de transformation* est la plus importante sont : au premier rang, et de loin, les États-Unis d'Amérique, puis le Japon et, sans doute, l'U.R.S.S., ensuite la Grande-Bretagne, l'Allemagne de l'Ouest, la France, l'Italie. Par ailleurs, de grandes différences se manifestent dans le *niveau de consommation* d'articles en caoutchouc dans les divers pays, par rapport au nombre d'habitants : pour le monde entier, cette consommation est de moins de 2 kg par personne et par an, alors qu'elle est supérieure à 11 kg aux États-Unis d'Amérique ; compte non tenu des besoins toujours nouveaux de l'industrialisation, de larges perspectives de développement restent donc ouvertes.

Tous ces élastomères sont employés pour de multiples *applications*, qui correspondent à plus de 40 000 articles ; dans une voiture automobile moderne, en dehors des pneus et chambres à air, on trouve plus de 500 pièces différentes en caoutchouc dont la masse totale est 30 à 50 kg. Pour situer l'importance relative des diverses fabrications, on peut dire que les pneumatiques représentent environ 63 % du total ; puis viennent le caoutchouc industriel (courroies, tuyaux, joints, garnissages, etc.) avec quelque 11 %, la mousse de latex avec 6 %, les articles chaussants avec 5 %, les 15 % restants comprenant notamment les jouets et articles de sport, les fils et câbles isolés, les tapis et revêtements de sol, les colles et adhésifs, etc.

Les ingénieurs de toutes branches ont de plus en plus à faire appel aux élastomères, que ce soit dans l'industrie automobile, l'aéronautique, l'équipement industriel, le bâtiment ou de nombreux autres domaines. L'étude des propriétés de ce matériau a permis de dégager, à leur intention, diverses règles en vue de son utilisation rationnelle ; mais, comme le caoutchouc est employé sous forme vulcanisée et que l'on sait faire varier de façon considérable (selon les formules) les caractéristiques des vulcanisats, la fabrication des éléments en caoutchouc nécessite souvent une liaison très étroite entre le manufacturier et l'utilisateur.

Pour l'avenir, on peut prévoir la poursuite d'un développement parallèle du caoutchouc naturel et des synthétiques, du fait des augmentations très importantes de rendement envisagées pour les plantations pour les premiers, de la diversification constante des types pour les seconds. On assistera probablement à un fort accroissement relatif des élastomères stéréospécifiques et des EPDM aux dépens d'autres synthétiques. Des organismes internationaux se préoccupent d'ailleurs des divers aspects économiques de ces problèmes en cherchant à assurer une production totale répondant aux prévisions de consommation, dans une union harmonieuse des possibilités de l'homme et de la nature.

Production des élastomères en 1970 (tonnes)	
Caoutchouc naturel	2 900 000
SBR	2 800 000
Polybutadiène	750 000
Polyisoprène	170 000
Caoutchoucs d'éthylène-propylène	130 000
Butylcaoutchouc	280 000
Caoutchoucs de chloroprène	260 000
Caoutchouc nitrile	210 000
Autres élastomères	100 000

Consommation d'élastomères des principaux pays industriels en 1970 (tonnes)	
États-Unis d'Amérique	2 600 000
U.R.S.S. (estimation)	900 000
Japon	770 000
Allemagne de l'Ouest	570 000
Grande-Bretagne	460 000
France	400 000
Italie	300 000
Autres pays d'Europe de l'Ouest	510 000

ÉLABORATION
DES
PIÈCES

FORMAGE DIRECT

CHAPITRE PREMIER

FONDERIE

1. GÉNÉRALITÉS

Sous le vocable « fonderie », on englobe généralement l'ensemble des techniques mises en œuvre pour obtenir un objet métallique (de forme et de dimensions définies) par la coulée d'un alliage (préalablement porté à l'état liquide dans un four de fusion approprié) dans une empreinte appelée *moule*.

La pièce obtenue par fusion et coulée doit répondre à quelques critères, en particulier, elle doit :

— être exempte de défauts apparents ou cachés ; c'est la *santé ;*
— présenter la forme et les dimensions requises pour son utilisation ; c'est la *précision dimensionnelle ;*
— être susceptible de se laisser façonner à l'aide des outils courants ; c'est l'*usinabilité ;*
— présenter une résistance suffisante vis-à-vis des diverses sollicitations auxquelles elle sera soumise afin d'assurer une tenue en service acceptable ; c'est la *résistance mécanique*.

La réalisation d'une pièce de fonderie nécessite diverses opérations que l'on peut grouper en cinq phases distinctes :

1° *Le modelage*. — C'est la création de la forme ou *modèle* de la pièce que l'on désire obtenir. Ce modèle constitue l'outillage indispensable à l'ouvrier mouleur pour la confection de l'empreinte ou moule.

2° *Le moulage*. — C'est la confection de l'empreinte ou moule à l'aide du modèle (avec ou sans noyau), c'est-à-dire de la réplique en creux de la pièce désirée. C'est dans ce moule que l'alliage liquide sera coulé et se solidifiera pour donner la pièce attendue. Le moulage englobera éventuellement le noyautage.

3° *La fusion et la coulée*. — L'alliage (dont la composition chimique doit être choisie en fonction des conditions futures d'utilisation de la pièce) doit être porté à l'état liquide et surchauffé, à une température suffisante pour atteindre la coulabilité indispensable à l'obtention d'une bonne venue de la pièce. Le four de fusion diffère suivant la nuance de l'alliage.

4° *Le décochage*. — Après solidification de l'alliage dans l'empreinte, la pièce est séparée de la matière qui constituait le moule, puis on détache les parties métalliques adhérentes qui ont servi à la coulée et à l'alimentation de la pièce en métal liquide (canaux de coulées, masselottes et évents).

5° *L'ébarbage*. — Les moignons de coulée, d'évents ou de masselottes éventuels sont meulés ou burinés ainsi que les bavures.

Il est aisé de comprendre que la coulée d'un alliage liquide dans une empreinte, qui est réalisée avec un matériau suffisamment réfractaire pour résister sans dommage à la température de coulée, permet, après solidification, de reproduire directement des formes très compliquées bien plus facilement et d'une façon bien plus économique que les autres procédés habituels conjugués : le forgeage, le matriçage et l'emboutissage qui doivent être complétés, par un usinage pour les parties évidées.

C'est ce qui explique que la fonderie (une des plus anciennes techniques de notre civilisation), bénéficiant des procédés et des produits nouveaux, continue de se développer notamment pour la fabrication de pièces en grande série pour l'industrie automobile.

1.1. Classification des fonderies d'après l'alliage utilisé.

— Chaque nuance d'alliage implique un appareil de fusion approprié. C'est ainsi que l'on distingue :

1.1.1. Les fonderies d'alliages ferreux :

— fonderies d'acier moulé, dans lesquelles on coule des alliages ferreux dont la teneur en carbone varie entre 0,05 % et 0,50 % environ ;
— fonderies de fonte malléable, dont la teneur en carbone est comprise entre 2,20 % et 3,00 % environ ;
— fonderies de fonte grise, dont la teneur en carbone peut varier entre 2,50 % et 3,80 % environ selon les applications.

1.1.2. Les fonderies d'alliages cuivreux (teneur en cuivre supérieure à 50 %) :

— fonderies de cuivre qui élaborent des alliages contenant plus de 95 % de cuivre ;
— fonderies de bronze qui élaborent des alliages contenant plus de 50 % de cuivre et de l'étain ;
— fonderies de laiton qui élaborent des alliages contenant plus de 50 % de cuivre et du zinc ;
— fonderies de cupro-nickel qui élaborent des alliages contenant plus de 50 % de cuivre et du nickel ;
— fonderies de cupro-aluminium qui élaborent des alliages contenant plus de 50 % de cuivre et de l'aluminium.

Dans de nombreux cas, les fonderies d'alliages cuivreux coulent plusieurs nuances d'alliages.

1.1.3. Les fonderies d'alliages d'aluminium (plus de 50 % d'aluminium). — En général, ces fonderies coulent simultanément, plusieurs alliages qui comprennent :

— les alliages aluminium-silicium dont le principal s'appelle *Alpax* en France, du nom de son inventeur Aladar Pacz, et *silumin* dans les pays anglo-saxons ;
— les alliages aluminium-cuivre avec le duralumin (du nom de Düren, ville allemande où Alfred Wilm le premier traita ces alliages) ;
— les alliages aluminium-magnésium et aluminium-magnésium-silicium ;
— les alliages aluminium-manganèse ;
— les alliages aluminium-zinc.

1.1.4. Les fonderies d'alliages de magnésium. — Ces fonderies traitent des alliages de magnésium allié au zinc ou à l'aluminium (avec plus de 50 % de magnésium).

1.1.5. Les fonderies d'alliages blancs. — Ces fonderies utilisent des métaux à bas point de fusion tels que le zinc, le plomb, l'étain, le bismuth, l'antimoine, etc.

1.2. Classification des fonderies, indépendamment de la nuance du métal

1.2.1. Les fonderies sur modèles. — Ces fonderies fabriquent des pièces moulées sur des modèles particuliers avec un alliage dont la nuance est spécifiée sur la commande de leur client.

1.2.2. Les fonderies sur album. — Ces fonderies coulent des pièces à usages divers, la plupart du temps à usage domestique, moulées sur leurs propres modèles, coulées avec une ou plusieurs nuances d'alliages.

1.2.3. Les fonderies de chauffage. — Ces fonderies sont chargées de fournir les pièces coulées en fonte, en laiton et en alliages légers aux ateliers de montage d'appareils de chauffage.

1.2.4. Les fonderies de radiateurs. — Leur principale activité consiste à fabriquer des chaudières et des radiateurs en fonte pour le chauffage central, ainsi que les accessoires comme les robinets et vannes en alliages cuivreux et les raccords en fonte malléable. Comme les frais d'installation et d'outillage nécessaires à cette spécialité sont très élevés, ces fonderies sont peu nombreuses.

1.2.5. Les fonderies d'ameublement ou d'ornement. — Ces fonderies coulent en acier, en fonte, en laiton, en bronze et en alliages d'aluminium ou de zinc, selon divers procédés, des pièces destinées à orner les meubles ou les appartements (serrurerie, lustrerie, etc.).

1.2.6. Les fonderies d'art. — Ces fonderies reproduisent, le plus souvent en bronze, en laiton ou en alliage de plomb, les œuvres créées par des sculpteurs. Le modèle original est pétri avec de la terre à modeler en général. Cet original est ensuite reproduit au plâtre, afin de livrer au mouleur un modèle dur et résistant, sur lequel il pourra exécuter son moule sans risquer d'altérer les formes originales créées par l'artiste.

1.2.7. Les fonderies en coquille par gravité. — Ces fonderies fabriquent des pièces en coulant des alliages de zinc (zamak), des alliages d'aluminium et des alliages cuivreux (laiton et cupro-aluminium), ainsi que plus récemment de la fonte et de l'acier, dans des moules métalliques permanents, appelés *coquilles*.

1.2.8. Les fonderies au renversé. — Ces fonderies coulent des alliages blancs, à base de zinc, dans des moules métalliques permanents, vidés par renversement après une solidification partielle. Ce procédé peu connu est le plus souvent l'apanage de fonderies artisanales.

1.2.9. Les fonderies sous pression. — Dans ces fonderies, les pièces sont obtenues par injection (sous une grande pression) d'alliages blancs, d'alliages de zinc (zamak), d'alliages d'aluminium ou de magnésium et d'alliages cuivreux (laiton ou cupro-aluminium) dans des coquilles, en aciers spéciaux traités, placées sur des machines spéciales qui exécutent automatiquement les manœuvres de fermeture et d'ouverture des moules ainsi que l'éjection des pièces solidifiées et, quelquefois, l'alimentation en métal liquide.

1.2.10. Les fonderies sous pression centrifuge. — Ces fonderies font appel à la force centrifuge pour la coulée de pièces de révolution (tuyaux, roues) horizontalement ou verticalement.

1.2.11. Les fonderies de précision, en cire perdue. — Ces fonderies reproduisent les pièces en utilisant un modèle en cire qui sera détruit (d'où le nom de cire perdue). La précision des pièces ainsi obtenues, qui peut atteindre quelques centièmes de millimètre, explique le qualificatif de « fonderie de précision ».

2. MODELAGE

Le modelage est l'ensemble des différents procédés et moyens utilisés dans le but de créer un modèle (avec ou sans boîte à noyau) qui sera fourni au mouleur, afin qu'il exécute un moule.

Par modèle, on désigne généralement la forme, l'appareil ou l'ensemble des outillages qui, par les procédés usuels, serviront à reproduire la pièce désirée.

2.1. Classification des modèles.

— Les modèles peuvent être classés d'après leur aspect et leur utilisation, ou d'après le matériau qui les constitue.

2.1.1. Classement d'après l'aspect du modèle et d'après son utilisation (dans l'ordre croissant de complexité).

1° *Modèles pour le moulage au trousseau :* ce sont de simples planches de forme donnant le profil de la pièce à obtenir par découpage d'un sable préalablement serré.

Ce troussage peut être *circulaire :* la planche est fixée sur un support, appelé volet, branche ou porte-planche, qui tourne sur un axe vertical ou horizontal emboîté dans une crapaudine ou dans deux paliers (fig. I-1).

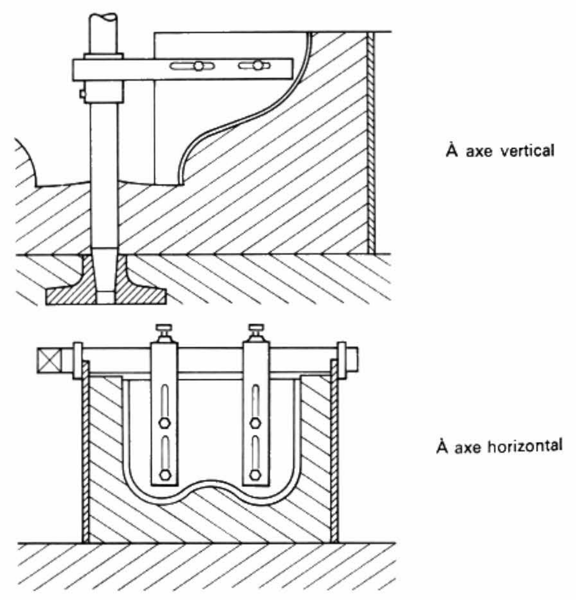


Fig. I-1 — Troussage circulaire

Il peut être *réglé :* la planche à trousser glisse sur des règles de guidage appelées *gabarits* dont la forme épouse celle de la pièce à fabriquer, le profil étant obtenu en taillant le sable du moule à l'aide de la planche (fig. I-2).

2° *Modèles simplifiés :* appelés *squelettes* ou *carcasses,* ils donnent la forme générale de la pièce par quelques génératrices caractéristiques. On complète le modèle en remplissant les creux avec du plâtre (ou avec du sable de

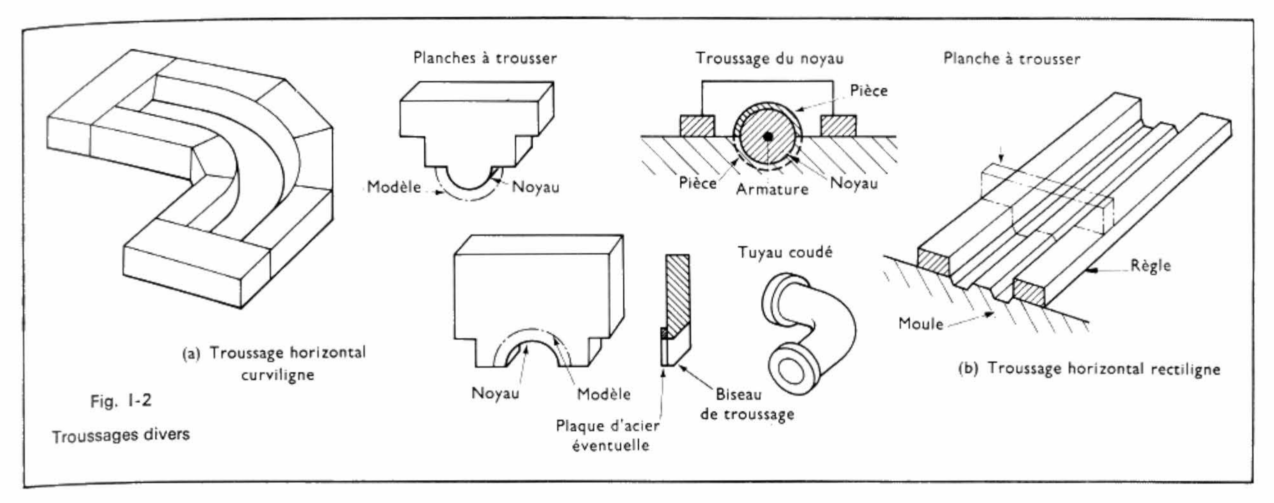


Fig. I-2

Troussages divers

moulage serré) qui est taillé et lissé à la forme du modèle, puis enduit de poudre isolante ou recouvert de papier afin d'éviter le collage avec le sable du moule. Cette technique réduit considérablement les frais de création du modèle, surtout lorsqu'il est de grandes dimensions ; il permet de réaliser, en quelques exemplaires, des pièces relativement compliquées à un prix de revient assez économique (fig. I-3).

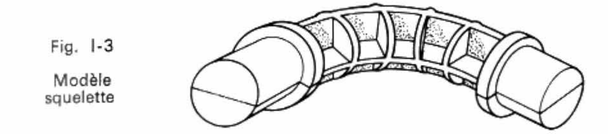


Fig. I-3

Modèle squelette

3° *Modèles au naturel :* leur forme, identique à celle de la pièce, peut être obtenue par moulage direct ou à l'aide de mottes battues simples (fig. I-4).

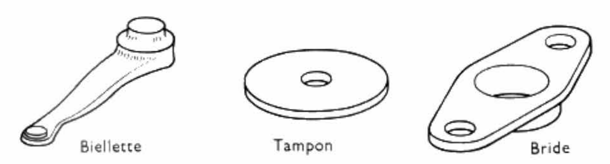


Fig. I-4 — Modèles au naturel

4° *Modèles avec boîtes à noyaux :* lorsque la forme intérieure de la pièce ne peut être moulée directement, on utilise des noyaux. Ce sont des formes matérialisées par du sable aggloméré ; elles représentent la partie intérieure, de sorte qu'en général, l'extérieur de la pièce est donné par le modèle et l'intérieur est évidé par les noyaux. La position des noyaux est assurée par des portées, fixées en saillie sur le modèle (fig. I-5). C'est le cas le plus général que l'on rencontre dans les fonderies sur modèles.

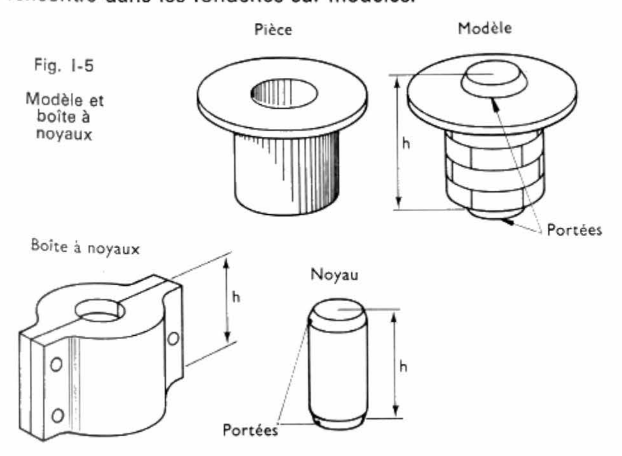


Fig. I-5

Modèle et boîte à noyaux

5° *Plaques modèles :* lorsque les pièces doivent être produites en grande quantité, les modèles sont fixés sur des plaques et le moulage est exécuté sur machines. On distingue :

— *les plaques-modèles simple face* où les deux parties de modèle sont fixées sur deux plaques indépendantes qui permettent de mouler séparément la partie de dessus et la partie de dessous du moule (fig. I-6) ;

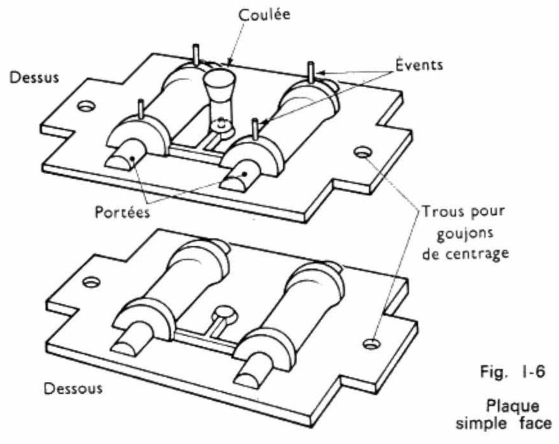


Fig. I-6

Plaque simple face

— *les plaques-modèles double face* où les deux parties de modèle sont fixées de part et d'autre d'une même plaque ; le moulage est réalisé de part et d'autre de la plaque sur la même machine (fig. I-7) ;

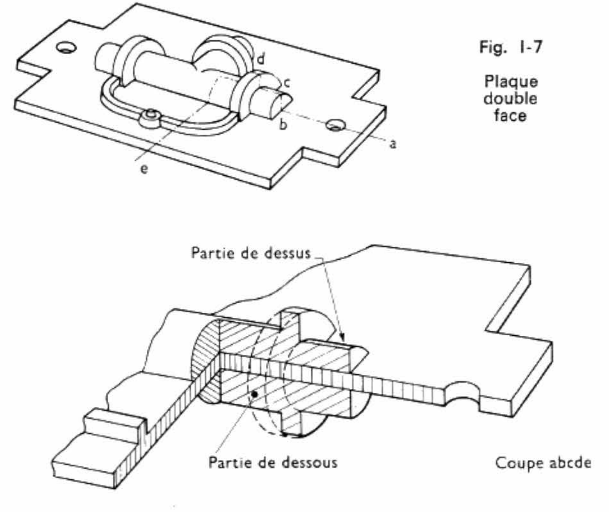
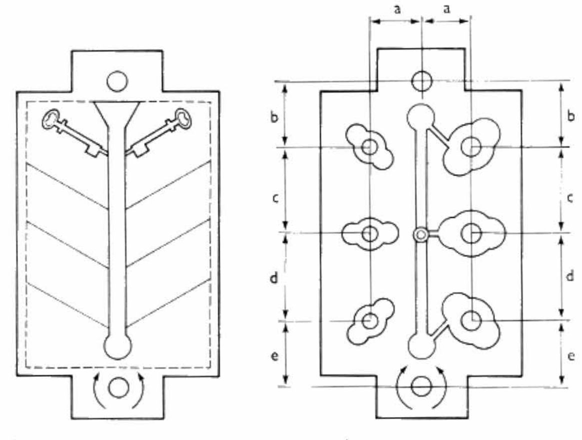


Fig. I-7

Plaque double face

— *les plaques-modèles réversibles* où les deux parties de modèles sont fixées symétriquement sur la même face



(a) À coulée en presse verticalement (b) À coulée horizontalement

Fig. I-8 — Plaque réversible

d'une plaque, de telle façon qu'une partie du moule soit complémentaire d'une autre partie identique (fig. I-8).

Dans ces trois cas, des canaux de coulée, attaques, évents et masselottes sont fixés sur la plaque avec les modèles de façon que les moules soient complets et ne nécessitent pas l'intervention de l'ouvrier pour tailler dans le moule.

2.1.2. Classement des modèles d'après le matériau qui les constitue

1° *Modèles en bois.* — Le bois est un matériau facile à travailler et éventuellement à modifier mais il est fragile et très sensible aux variations de l'état hygrométrique de l'air ; de plus, ces modèles s'usent assez rapidement au contact du sable de moulage.

2° *Modèles métalliques.* — Lorsque la série de pièces à fabriquer est importante, aux modèles en bois on substitue des modèles métalliques dont la durée en service est nettement plus longue. On les classe d'après l'alliage utilisé pour les fabriquer :

— *Modèles en alliage blanc :* cet alliage a un faible retrait de solidification et un bas point de fusion, mais une grande masse volumique. Faciles à obtenir par surmoulage de modèle en bois, ces modèles permettent de mouler de nombreuses séries de pièces avant que l'usure ne les rende inutilisables. Ils sont facilement réparables par soudure au fer et, de plus, ils ne s'oxydent pas.

— *Modèles en alliage d'aluminium :* cet alliage s'usine facilement, se polit bien ; sa masse volumique est faible (2,6 g/cm^3 environ), il convient surtout pour les plaques-modèles double face. Toutefois, il s'use assez rapidement, ne permet pas la réparation par soudure au fer et s'oxyde dans l'air humide.

— *Modèles en bronze :* cet alliage, facile à usiner et susceptible d'un beau poli, s'use assez rapidement mais permet la réparation par soudure au fer. Sa masse volumique est d'environ 9 g/cm^3 et son prix de revient est élevé.

— *Modèles en fonte :* cet alliage est facile à usiner avec précision et se polit bien mais il s'oxyde lentement à l'air. Sa masse volumique (7,2 g/cm^3 environ) est plus faible que celle du bronze. Son prix de revient est relativement bas.

— *Modèles en acier :* cet alliage est assez lourd (masse volumique : 7,8 g/cm^3) ; facile à usiner avec précision, il donne un beau poli mais il s'oxyde et s'use rapidement. Il est utilisé lorsque les formes sont facilement obtenues par usinage, tournage et fraisage.

Remarque : dans le cas de modèles en alliages d'aluminium, de bronze et de fonte, lorsque les formes sont obtenues par surmoulage d'un modèle en bois, les dimensions de celui-ci sont prévues en tenant compte des retraits successifs (retrait de l'alliage constituant le modèle et retrait de l'alliage constituant la pièce). Le modèle en bois correspondant est dit à double retrait.

3° *Modèles en plâtre.* — Sauf dans le cas de moulage d'art, pour lequel le modèle en plâtre est la reproduction fidèle de l'œuvre originale de l'artiste, les modèles en plâtre utilisés industriellement font partie de l'ensemble appelé « couche plâtre », qui est similaire à un jeu de plaques-modèles simple face, avec deux parties constituant l'une le modèle du moule de dessus et l'autre celui du moule de dessous.

4° *Modèles en matière plastique.* — Leur utilisation, relativement récente pour l'exécution des modèles de fonderie, découle des avantages qu'ils présentent, pour cet usage, par rapport aux modèles précédents : légèreté, inoxydabilité, insensibilité à l'humidité, stabilité dimensionnelle et de forme, caractéristiques mécaniques excellentes, bonne résistance à l'usure par frottement du sable, et bonne résistance aux chocs. La réparation est relativement aisée.

5° *Modèles en cire.* — Cette technique, plusieurs fois millénaire, est encore utilisée de nos jours par certains artistes pour la coulée d'œuvre d'art (statues, cloches, etc.). Sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre la font préférer aux autres procédés habituels, lorsqu'il s'agit de créer des prototypes de formes compliquées et de faibles dimensions. En outre, elle est toujours utilisée en dentisterie et en joaillerie. Industriellement, le modèle en cire est à la base du procédé appelé *moulage de précision* ou encore *moulage à la cire perdue.*

2.2. Caractéristiques d'un modèle.

— Un bon modèle doit présenter les caractéristiques essentielles suivantes : être précis dans ses dimensions, respecter les formes avec exactitude, être conçu de manière à faciliter le moulage, l'ébarbage et l'usinage.

2.2.1. Exactitude et précision.

— Ces deux caractéristiques sont influencées par de nombreux facteurs, dont les principaux sont :

1° *La nature du matériau* constituant le modèle : ainsi un modèle en bois subit l'influence de l'humidité ambiante et, pour certaines essences et dans certaines circonstances, son volume peut varier de plus de 3 %.

2° *Le mode de moulage.* — Le moulage à la main est moins précis que le moulage à la machine, à cause de l'ébranlage du modèle et des raccords du moule.

3° *Les phénomènes métallurgiques,* qui accompagnent la solidification des alliages et leur refroidissement à l'état solide et qui modifient les dimensions des pièces. On appelle *retrait* la différence qui existe entre la dimension du modèle et celle de la pièce obtenue par moulage et coulée. Cette différence est due, d'une part, à la contraction qui se produit au moment où l'alliage passe de l'état liquide à l'état solide et, d'autre part, à la diminution de volume du solide, lorsqu'il se refroidit de la température de solidification à la température ambiante (inverse de la dilatation qui se produit dans le même intervalle de température).

Pour compenser ces variations, les modèles sont établis en tenant compte de ce retrait, dont la valeur moyenne, est indiquée dans le tableau suivant pour les alliages courants de fonderie.

Alliages	Retrait en pourcentage
Aciers	1,2 à 2,0
Fonte blanche	1,5 à 2,0
Fonte à graphite sphéroïdal	1,2 à 1,8
Fonte grise	0,5 à 1,5
Alliages cuivreux : — bronze	1,4 à 1,5
— laiton	1,4 à 1,8
Alliages d'aluminium	1,2 à 1,8
Alliages de magnésium	1,3 à 1,9
Alliages blancs	0,1 à 0,5

2.2.2. Conception du modèle

1° *Dispositions facilitant le moulage :*

— *La dépouille :* afin de pouvoir extraire le modèle sans abîmer le moule, on donne une légère pente aux parois du modèle par rapport à l'axe de démoulage, axe généra-

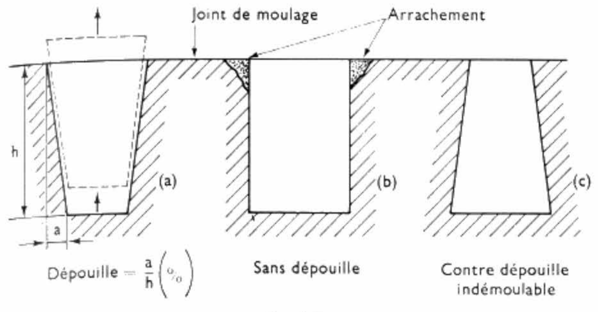


Fig. I-9

lement perpendiculaire au plan de joint de moulage. Cette inclinaison prend le nom de *dépouille* (fig. I-9). Elle s'exprime sous forme de pourcentages ou quelquefois en degrés. Son importance dépend de la forme et du poli du modèle ainsi que de la nature du matériau (les modèles métalliques se démoulant mieux que les modèles en bois, nécessitent moins de dépouille). Elle dépend aussi du serrage du sable et des difficultés inhérentes à l'ébranlage et à l'extraction du modèle du sable (un modèle de grande dimension nécessite plus de dépouille qu'un petit modèle et un modèle haut, plus qu'un modèle plat). Cette dépouille

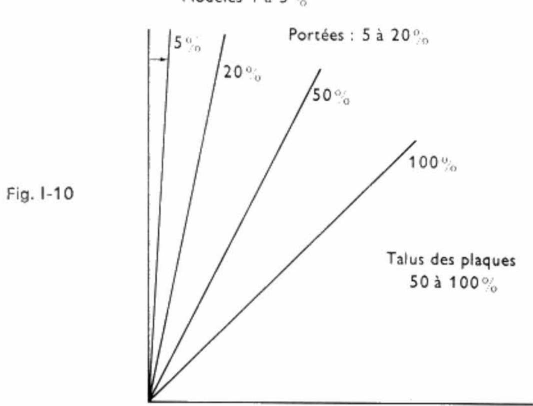


Fig. I-10

peut varier de 0,1 à 5 % pour le modèle proprement dit, de 5 à 20 % pour les portées de noyaux et de 50 à 100 % pour les talus des plaques-modèles (fig. I-10). Les valeurs de dépouille normalisée sont les suivantes: 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20 ,50 et 100 % (N.F. A 72-528).

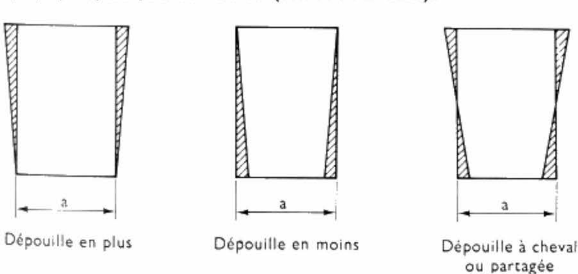


Fig. I-11

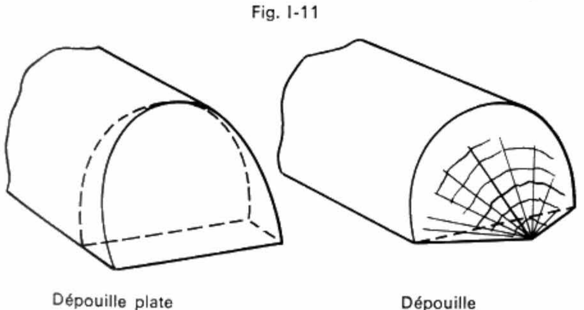
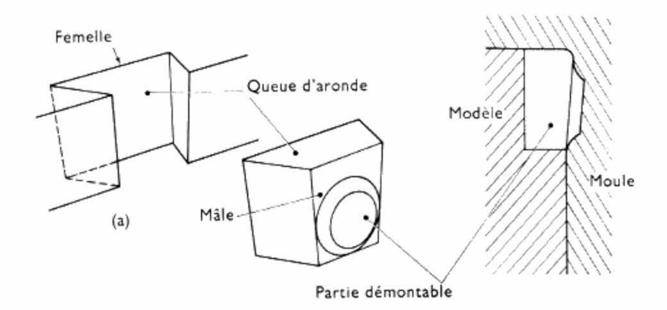


Fig. I-12

La dépouille est dite *en plus* lorsqu'elle correspond à un excédent de matière, *en moins* lorsqu'elle correspond à une réduction de matière, *partagée* ou *à cheval* si une moitié est en plus et l'autre en moins (fig. I-11). Pour les parties rondes, elle est dite *plate* lorsque la partie ronde est terminée par un plan incliné et *tournée* quand elle se termine par un cône exécuté au tour (fig. I-12). Dans ces deux derniers cas, la dépouille est toujours en plus.

— *Les parties démontables :* dans certains cas, le modèle présente des parties sans dépouille, ou encore en contre-dépouille. Dans le moulage à la main, on utilise quelquefois la technique dite de *pièce* ou de *motte battue*, qui consiste à serrer contre cette partie du modèle une motte de sable, indépendante du moule et bien armée; on la retire avant démoulage du modèle et elle est ensuite remise en place pour compléter le moule. Cette technique est très utilisée dans le moulage d'art.

Dans le moulage industriel, pour plus de facilité et de précision, il est plus courant de rendre certaines parties de moule démontables pour simplifier le démoulage de la partie principale du modèle, pendant que celle sans dépouille ou en contre-dépouille reste dans le moule. Elle est ensuite démoulée séparément, d'abord latéralement pour dégager la partie en contre-dépouille, puis verticalement. Quelquefois, la partie en contre-dépouille exige un démoulage oblique. Les parties démontables doivent être soigneusement repérées sur le modèle afin d'occuper leur place exacte sur la pièce obtenue. En général, elles ont une embase en queue d'aronde ou un emmanchement goujonné, bien dépouillé, ajusté avec précision sur le modèle (fig. I-13).



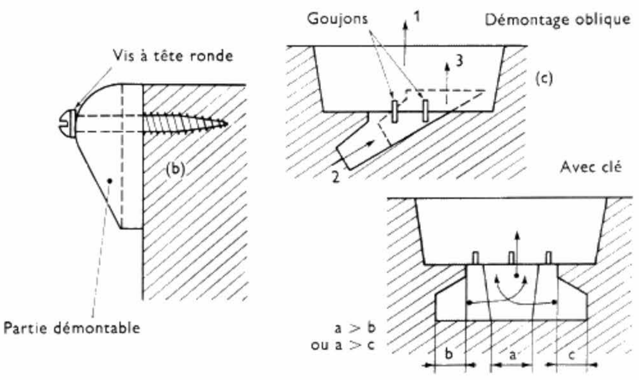


Fig. I-13

— *Les noyaux :* dans le moulage en grande série, les mottes battues, ou les parties démontables, sont remplacées par des noyaux. De même, les parties de la pièce, qui ne peuvent pas être obtenues creuses par moulage direct, sont évidées à l'aide de noyaux. Le modèle est alors complété par des formes supplémentaires, appelées *portées de noyaux*. Dans le moule elles formeront des creux qui serviront à situer et à supporter le noyau. Le modèle est accompagné des boîtes à noyaux qui permettront d'exécuter à part les noyaux en sable aggloméré.

Les portées sont utilisées également pour canaliser les gaz dégagés par les noyaux au moment de la coulée et les évacuer hors de la pièce. Elles ont des formes diverses

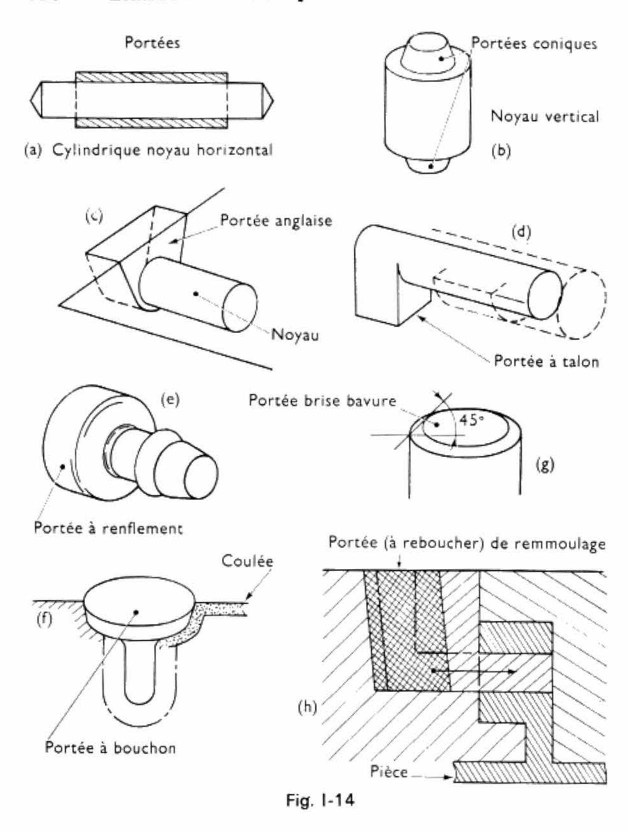


Fig. I-14

et les principales, auxquelles on fait appel afin de favoriser le moulage ou le remoulage du noyau et même l'ébarbage, sont représentées sur la figure I-14.

2° *Dispositions favorisant l'ébarbage.* — Tous les joints du moule et des noyaux sont générateurs de bavures qu'il faut faire disparaître avant la livraison des pièces. Pour cette opération d'ébarbage, on utilise des outils à main (pneumatiques) ou des meules de grand diamètre montées sur des bâtis. La position et la forme des bavures doivent être prévues de manière à faciliter cette opération. Il est souvent avantageux de rassembler le plus grand nombre de bavures sur une face devant être usinée (cela évite l'ébarbage). Dans ce but, les positions des joints et des portées de noyaux doivent être soigneusement étudiées avant l'exécution du modèle.

3° *Dispositions favorisant l'usinage.* — Il faut prévoir une réserve de matière suffisante, appelée *surépaisseur d'usinage*, sur toutes les parties qui subiront un façonnage ultérieur (rabotage, tournage, fraisage, etc.). La valeur de cette surépaisseur est fonction de la dimension, des formes et de la complexité du moulage, ainsi que des déformations que la pièce peut subir en cours de refroidissement. Certaines de ces déformations, dues aux tensions internes résultant d'un refroidissement irrégulier, peuvent être réduites, ou même compensées totalement, par une modification du modèle. Malheureusement, il n'y a pas de règle générale et, le plus souvent, on les corrige empiriquement.

Remarque : les diverses dispositions précédentes risquent de perturber fortement la précision et l'exactitude des pièces obtenues par moulage sur modèles corrects, aussi, un accord (qui est un compromis) doit-il intervenir entre le fondeur et son client, afin de fixer les tolérances sur les dimensions des pièces.

Les tolérances générales sur les pièces de fonderie ont été normalisées et font l'objet de plusieurs normes françaises (NF A 32-011, 012, etc.) auxquelles il est fortement conseillé de se conformer. Les services techniques des armées de terre, de l'air et de mer ainsi que ceux de la S.N.C.F. ont établi leurs propres spécifications techniques. Toutefois, des cas particuliers peuvent déroger à ces normes et donner lieu à des accords spéciaux.

2.3. Choix du matériau pour la confection du modèle. — Pour la confection du modèle, les éléments principaux qui interviennent dans le choix du matériau sont les suivants :

— les dimensions de la pièce à fabriquer ;
— la quantité de pièces à fabriquer (commande initiale et si possible commandes suivantes) ;
— les tolérances dimensionnelles exigées pour les pièces ;
— le mode de moulage utilisé compte tenu des conditions précédentes et, éventuellement, la forme et les dimensions des machines à mouler utilisées et leurs caractéristiques (mode de serrage : pression, secousses et pression, vibrations et pression ou projection ; mode de démoulage : direct ou après retournement du moule).

2.3.1. Modèles en bois. — Le bois est un matériau facile à travailler et d'un prix relativement avantageux, c'est pourquoi il est couramment utilisé dans la fabrication :

— des modèles à simple retrait destinés au moulage à la main ;
— des modèles à double retrait, appelés *modèles mères* qui servent à couler des modèles métalliques (dits surmoulés) ou, suivant une technique plus récente, en matière plastique. Dans ce dernier cas, la matière plastique n'ayant qu'un retrait très faible et négligeable, les modèles utilisés ne nécessitent pas ce double retrait.

1° *Choix des essences.* — Parmi les différentes essences de bois employées en modèlerie, on distingue :

— les bois feuillus tendres : aulne, peuplier et tilleul ; leurs applications sont limitées aux modèles simples et de petites dimensions ;
— les bois feuillus durs : chêne, hêtre, frêne et orme sont choisis pour les charpentes (ou ossatures) et les renforts de modèles de grandes dimensions ou pour les parties soumises à de fortes contraintes ou à un travail particulièrement dur. Noyer, poirier et châtaignier (et hêtre) sont réservés à la confection des parties ouvragées et des parties démontables, en contact direct avec le sable ;
— les bois résineux : pin, sapin et mélèze sont employés pour les armatures ; toutefois, le pin, risquant de sécréter de la résine et de coller, ne doit pas être mis en contact direct avec le sable.

2° *Outils et machines utilisés en modèlerie.* — Comme, en général, le modèle en bois n'est construit qu'à un seul exemplaire, sa préparation est faite manuellement à l'aide des outils et des machines à bois simples utilisés par les autres spécialistes du travail du bois (charpentiers, menuisiers et ébénistes). Les machines les plus courantes sont :

— les scies : à main, à ruban, circulaire ou alternative (appelée aussi sauteuse) ;
— les dégauchisseuses : elles permettent de dresser l'une des deux faces d'une planche brute. (fig. I-15) ;

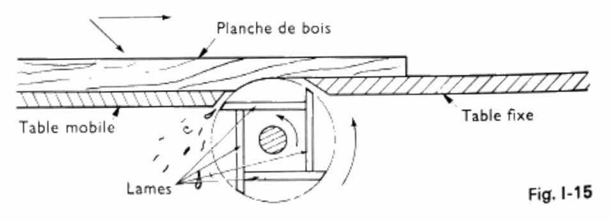
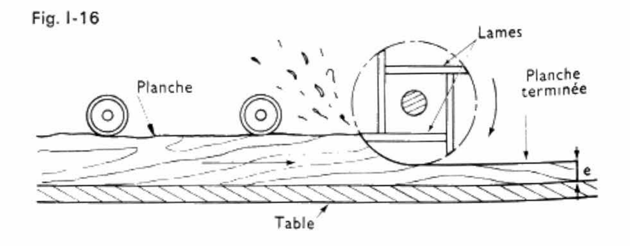


Fig. I-15

— les raboteuses à déplacement mécanique : la face dressée à la dégauchisseuse est placée sur la table de la machine et la planche est entraînée sous les lames tranchantes par des rouleaux commandés (fig. I-16) ;

Fig. I-16



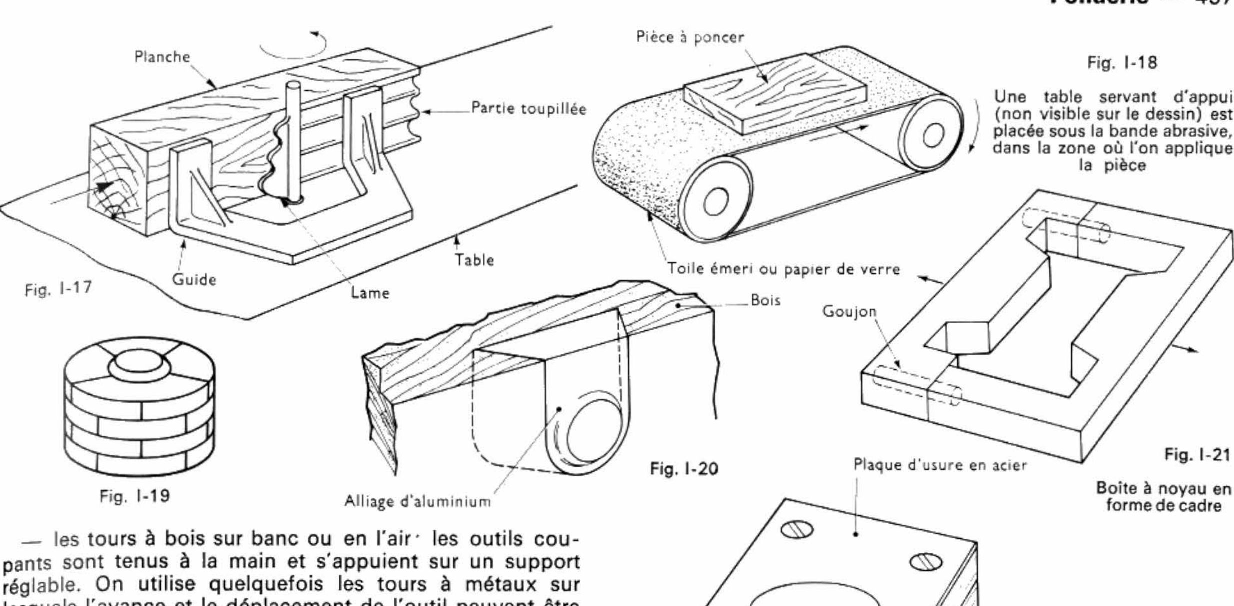


Fig. I-17

Fig. I-18

Fig. I-19

Fig. I-20

Fig. I-21
Boîte à noyau en forme de cadre

Plaque d'usure en acier

Fig. I-22
Boîte à noyau à fond

Portées coniques

Goujon

Trou pour goujon

Boîte goujonnée

Fig. I-23
Boîte à noyau en deux parties

— les tours à bois sur banc ou en l'air· les outils coupants sont tenus à la main et s'appuient sur un support réglable. On utilise quelquefois les tours à métaux sur lesquels l'avance et le déplacement de l'outil peuvent être manuels ou automatiques ;

— les perceuses simples à table mobile latéralement et réglage en hauteur ;

— les défonceuses, sortes de perceuses sur lesquelles l'outil (mèche ou foret) est fixe. Elles servent à creuser des trous de formes diverses par déplacement latéral et vertical de la table supportant la pièce de bois ;

— la toupie : composée essentiellement d'un arbre vertical (porte-outil) et d'une table supportant la pièce de bois à façonner ; celle-ci est plaquée par l'ouvrier contre un guide réglable le long duquel il la déplace horizontalement (fig. I-17) ;

— la ponceuse : constituée par un ruban de toile émeri vertical ou horizontal entraîné par une poulie, ou par un disque de papier verre, tournant à grande vitesse et contre lesquels on applique la face du modèle à poncer (fig. I-18) ;

— la machine à copier ou à reproduire : elle permet de reproduire rapidement les formes compliquées et est utilisée lorsque le modèle doit être remplacé (en totalité ou en partie) périodiquement et fréquemment. Elle donne une forme approchée qu'il faut ensuite terminer à la main. Toutefois, ce remplacement fréquent ne se rencontre que dans le moulage en grande série dans lequel les modèles en bois sont remplacés par des modèles métalliques ou en matière plastique, de sorte qu'actuellement la machine à copier est très peu utilisée pour le bois.

De plus, pour compléter cet ensemble de machines qui produisent beaucoup de copeaux et de sciure, un dispositif d'aspiration efficace est indispensable afin de maintenir les locaux propres et exempts de déchets encombrants, et contribuer ainsi à réduire les causes d'accident.

3° *Construction des modèles et boîtes à noyaux en bois*

a) *Modèles en bois :* utilisés dans le moulage à la main, ou comme modèles mères, doivent être construits très solidement afin d'éviter leur déformation et une mise hors service trop rapide. Les divers éléments sont collés avec des colles insensibles à l'humidité et consolidés ensuite à l'aides de pointes, de vis ou de boulons afin de résister aux contraintes et aux chocs auxquels ils seront soumis au cours du serrage du sable, de l'ébranlage et du démoulage, ainsi qu'aux variations de volume et au gauchissement dus aux fluctuations de l'état hygrométrique du bois en contact avec le sable humide. Afin de compenser le mieux possible ces déformations, on procède par assemblages d'éléments dont on croise les fibres (fig. I-19). Les parties démontables doivent être particulièrement soignées : leur bois doit être choisi sans défaut et sans nœud dans une essence qui résiste bien à l'usure, comme le noyer ou le hêtre. Elles sont fréquemment réalisées en alliage d'aluminium (fig. I-20).

b) *Boîtes à noyaux :* les boîtes à noyaux sont de véritables *modèles en creux*. Elles sont construites selon les mêmes principes et aussi soigneusement que les modèles. L'usage des boîtes à noyaux en bois est limité à la confection de noyaux en sable de composition classique utilisé avec un agglomérant à prise à froid dans la boîte ou à chaud dans une étuve. Elles ne conviennent pas aux procédés de noyautage qui nécessitent un chauffage préalable de la boîte pour la polymérisation de l'agglomérant (dans ce cas, elles sont nécessairement métalliques).

Généralement, l'ensemble modèle et boîtes à noyaux en bois est réservé au moulage à la main. Cependant, dans le moulage sur machine en petite et moyenne série, la boîte à noyaux en bois peut être utilisée. Dans ce cas, le plan de raclage est renforcé par des plaquettes en tôle d'acier, fixées par vis, dans le but d'en ralentir l'usure. Elles sont métalliques dans la fabrication de pièces en grande série.

Lorsque les boîtes à noyaux présentent des parties en contre-dépouille, celles-ci sont démontables et repérées dans la boîte principale par un dispositif précis. Comme dans le cas des modèles, elles sont quelquefois rapportées en alliage d'aluminium.

Indépendamment du matériau qui constitue les boîtes à noyaux, celles-ci sont classées en :

— boîte en forme de cadre, ouverte sur les deux faces (fig. I-21) ;

— boîte à fond, ouverte sur une face (fig. I-22) ;

— boîte en deux ou plusieurs parties repérées par goujons (fig. I-23) ;

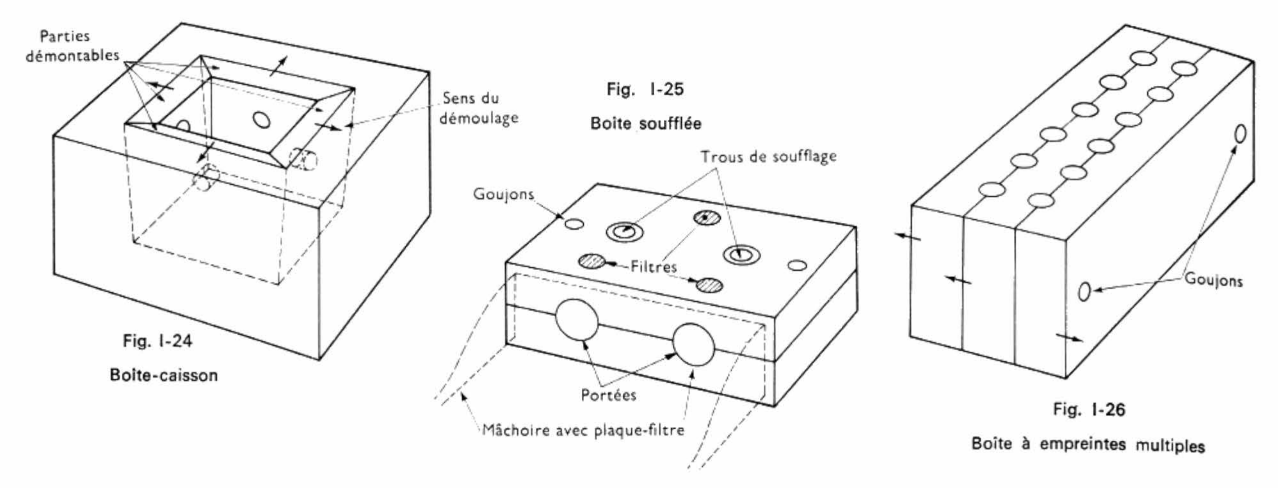


Fig. I-24
Boîte-caisson

Fig. I-25
Boîte soufflée

Fig. I-26
Boîte à empreintes multiples

— boîte-caisson (ou boîte enveloppe ou boîte en auge), dans laquelle la forme du noyau est donnée par des parties démontables contenues dans le caisson qui les centre et les maintient pendant le serrage du sable. Lorsque le noyau est terminé, la boîte est retournée et le caisson est enlevé, libérant les parties démontables qui sont démoulées séparément (fig. I-24) ;

— boîtes pour le soufflage des noyaux : le plus souvent, les boîtes soufflées sont métalliques. Elles sont étudiées spécialement. Exceptionnellement, lorsque les boîtes en bois sont soufflées, il faut les serrer entre deux mâchoires d'étau pneumatique et les renforcer par une armature métallique afin d'éviter les risques d'accident par éclatement de la boîte sous l'action de la pression de l'air de soufflage. Ces boîtes soufflées comportent des trous de soufflage équipés de buses en métal dur (interchangeables) et d'orifices d'évacuation de l'air garnis de filtres spéciaux (à trous ou à fentes) dans le but de retenir le sable tout en laissant s'échapper l'air. Les points d'impact du sable dans la boîte sont renforcés par une plaquette en acier dur, résistant mieux à l'abrasion du sable que le matériau constituant la boîte. Lorsque cela est possible les points de soufflage sont choisis de préférence sur les portées du noyau (fig. I-25).

Les boîtes à empreintes multiples sont utilisées lorsque les noyaux sont de petite dimension et de forme simple. Que les noyaux soient serrés à la main ou à la machine, on a intérêt à prévoir des boîtes à plusieurs empreintes, afin de réduire les manutentions. Ces boîtes sont en deux ou en trois parties (fig. I-26).

c) *Congés :* Les raccords arrondis de deux surfaces de modèle ou de boîte à noyaux formant un angle rentrant sont appelés *congés*. Ces congés peuvent être taillés dans la masse, rapportés en cuir ou en matière plastique et collés. Parfois ils sont seulement signalés par un trait de peinture noire sur le modèle ou la boîte à noyaux, le mouleur remplaçant alors l'angle vif du sable par un arrondi dans le moule ou sur le noyau (fig. I-27). Dans les modèles et les boîtes à noyaux métalliques, en plâtre ou en matière plastique, les congés viennent sur l'outillage.

d) *Vernissage :* afin d'éviter la reprise d'humidité du bois, d'une part, et de faciliter le démoulage du modèle ou du noyau, en réduisant l'adhérence du sable, d'autre part, les modèles et les boîtes à noyaux sont vernis. Les vernis utilisés ne doivent pas être hydroscopiques ; les plus couramment employés sont la gomme laque ou les vernis cellulosiques. On en passe plusieurs couches de manière à combler parfaitement les pores et les joints du bois. Après séchage complet, chaque couche est soigneusement poncée au papier de verre fin de façon que les surfaces externes du modèle et internes des boîtes à noyaux soient bien lisses ; la dernière couche n'est pas poncée.

2.3.2. Modèles en bois comprimé imprégné de résine. — Ce matériau présente les avantages suivants :

— il est insensible à l'humidité ambiante ;

— il a une excellente résistance à l'usure due au frottement du sable (meilleure que celle des alliages d'aluminium) ;

— il donne des modèles à grande stabilité de forme et de dimensions ;

— il peut être fixé facilement et solidement par vis sur des plaques en bois ou en métal, pour l'équipement de plaque modèle destinée au moulage en série ;

— il permet d'atteindre les durées de service comprises entre celle des modèles en alliages d'aluminium et celle des modèles en bronze ; avec les modèles en bois comprimé on peut exécuter 40 000 à 50 000 moules environ ;

— quoique plus dense que le bois ordinaire, il est tout de même très léger (sa masse volumique est voisine de 2 g/cm^3) ;

— il se travaille avec les mêmes outils et les mêmes machines que le bois ordinaire ; il faut, toutefois, adapter les angles et les vitesses de coupe.

2.3.3. Modèles métalliques. — Les modèles métalliques ont toujours un prix de revient élevé mais on les utilise de préférence aux modèles en bois chaque fois que :

— la série de pièces à fabriquer est importante ;

— le modèle comporte des parois minces qui seraient trop fragiles en bois ;

— les tolérances sur les dimensions de la pièce sont réduites ;

— le démoulage du modèle est difficile et délicat.

Afin de réduire le prix des modèles métalliques, on les *surmoule* sur des modèles mères, généralement en bois, établis en tenant compte du double retrait. Ils sont ensuite travaillés au grattoir pour enlever les aspérités des pièces coulées et terminés à la toile émeri fine de manière à obtenir une surface parfaitement lisse sur laquelle le sable glissera aisément. Suivant leur destination, les surmoulés sont coulés

— en alliage blanc pour la constitution des modèles de plaques pour séries moyennes de pièces ou l'équipement des couches en plâtre ; on peut exécuter 20 000 moules environ avec des modèles de cette nature ;

— en alliage d'aluminium pour des séries de pièces allant jusqu'à 30 000 ou 40 000 moules mais surtout lorsque la plaque modèle doit être manœuvrée à la main, comme c'est le cas dans le moulage en mottes ;

— en alliage cuivreux ou en fonte, dans le cas de plaques-modèles pour le moulage en grande série ; ces matériaux permettent d'exécuter plus de 100 000 moules avant que l'usure ne rende les modèles inutilisables.

En revanche, les modèles en acier, sont obtenus par usinage. L'acier est utilisé lorsque les formes du modèle peuvent être exécutées facilement sur des machines courantes.

Les modèles métalliques ne sont utilisés qu'exceptionnellement à la place des modèles en bois pour le moulage à la main ; ils sont surtout montés sur une plaque en acier, en fonte ou en aluminium, pour constituer les plaques modèles.

2.3.4. Modèles en plâtre. — Les modèles proprement dits sont rarement réalisés en plâtre, sauf dans le moulage d'art.

Industriellement, le ou les modèles en plâtre font partie de la couche en plâtre qui tient lieu de plaque modèle pour

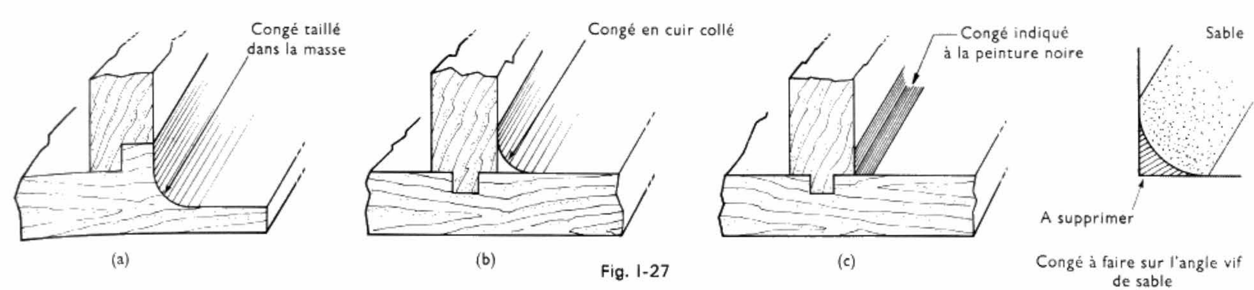


Fig. I-27

les fabrications des avant-séries ou de faibles séries de pièces. Les arêtes fragiles ou les parties délicates des modèles sont généralement rapportées en alliage blanc ou en alliage d'aluminium. Après séchage naturel et étuvage éventuel, les couches en plâtre sont enduites de gomme laque ou d'un vernis dur, afin de faciliter le glissement du sable du moule lors du démoulage. On peut mouler de 2 000 à 5 000 moules sur une couche en plâtre.

2.3.5. Modèles en matière plastique. — La technique d'exécution des modèles en matière plastique diffère suivant la dimension de la pièce, le mode de moulage adopté et le nombre de pièces à exécuter. On peut choisir entre les procédés suivants :

1° Pour la création de modèles et de boîtes à noyaux de petites dimensions, on peut utiliser un bloc de matière plastique (généralement de chlorure de polyvinyle) à la place de bois de modelage ordinaire. La matière plastique se taille, se tourne et s'usine avec facilité. De plus, elle ne présente pas l'inconvénient dû aux fibres du bois et elle se polit parfaitement.

2° Lorsque les dimensions du modèle ou de la boîte à noyaux dépassent les possibilités offertes par un bloc de matière plastique, on se sert d'éléments assemblés par collage ou par soudure au chalumeau à air chaud ou encore par vis et boulons.

3° Pour le formage de modèles ou de boîtes à noyaux de grandes dimensions ou destinés à la fabrication de pièces en grande série, on opère de la même façon que pour certaines carrosseries d'automobiles ou certains gros emballages : on plaque contre la forme à reproduire (soit par l'extérieur, soit par l'intérieur, suivant qu'il s'agit de boîte à noyaux ou de modèle) des couches de tissus en fibre de verre préalablement imprégnés d'un mélange de résine et d'un corps dit accélérateur ; ce dernier active la polymérisation de la résine à la température ambiante (environ 20 °C). Afin de rendre l'ensemble plus rigide, les parties creuses sont remplies de déchets de matières diverses (marbre, pierre, sable siliceux ou copeaux de bois) enduits du mélange de résine et d'accélérateur.

4° On utilise la matière plastique coulée lorsque les modèles ou les boîtes à noyaux sont soumis à un régime très sévère de production en grande série et atteignent rapidement le degré d'usure limite ce qui impose de les remplacer fréquemment. On prépare alors une empreinte (véritable réplique en creux de la forme du modèle ou du noyau à reproduire), soit en métal, soit en matière plastique coulée sur le premier modèle métallique créé ou dans la première boîte. La surface de cette empreinte est enduite d'un produit facilitant le démoulage et la matière plastique (la plupart du temps de l'araldite et son accélérateur), assez fluide pour être coulée, est versée dedans. L'ensemble est vibré afin d'assurer le remplissage parfait de la forme (fig. I-27 bis). Dans le but de réduire la consommation de résine dont le prix est élevé, on ajoute dans la masse des déchets de produits divers (marbre, pierre, sable siliceux ou même copeaux de bois). L'empreinte (ou faux moule, ou boîte à modèles) est utilisée à la manière d'un moule permanent dans lequel on coule périodiquement des modèles ou des boîtes à noyaux destinés au remplacement des outillages usés et qui présentent exactement les mêmes formes et les mêmes dimensions que le modèle original. Ce processus permet de réaliser d'importantes économies sur les temps d'exécution des outillages donc sur leur prix de revient.

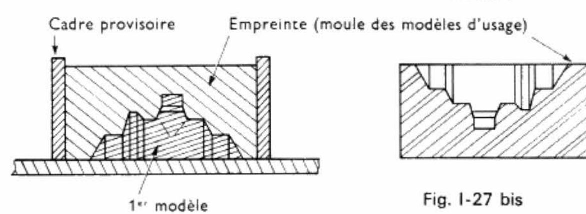


Fig. I-27 bis

5° On se sert du polystyrène expansé pour la création d'un modèle servant une seule fois et détruit à la coulée. Cette technique (dérivée du processus de la cire perdue) prend le nom de *moulage à modèle perdu gazéifiable*. Le modèle et ses accessoires (descente, canaux et attaques de coulées, évents et masselottes réalisés en polystyrène expansé de masse volumique comprise entre 0,1 et 0,2 g/cm^3) sont livrés montés au mouleur qui exécute un moule sans joint et laisse le modèle dans le sable. Le polystyrène se travaille assez facilement à l'aide d'outils tranchants ou à l'aide d'un fil métallique chauffé électriquement, ce qui permet le découpage rapide.

2.3.6. Modèles en cire. — Les modèles en cire sont obtenus par injection d'un mélange de cires (cire d'abeilles, cire de carnauba, colophane, cires minérales, etc.) mis au point dans le but de limiter la dilatation et d'éviter les variations de dimensions des pièces. On utilise une coquille métallique en alliage à bas point de fusion (bismuth, zinc, alliage de zinc, etc.) obtenue soit par coulée autour d'un modèle mère exécuté avec la précision exigée pour les pièces, soit usinée. On exécute autant de modèles en cire que nécessite la commande. Ces modèles sont ensuite assemblés par soudure, avec une cire de même qualité, sur un ensemble de jets et d'entonnoirs de coulée pour constituer les grappes.

Dans certains cas, le mélange de cire est remplacé par une matière thermoplastique (polystyrène ou polyéthylène) injectée dans une coquille métallique et refroidie. Comme pour la cire, les modèles obtenus sont ensuite assemblés en grappes.

De plus, avec le même procédé, on utilise la propriété que présente le mercure solidifié de se souder à lui-même par simple pression. On remplit la coquille de mercure liquide et on le solidifie en abaissant l'ensemble à une température inférieure à — 40 °C. Les modèles en mercure congelé sont autosoudés au canal de coulée, également en mercure congelé, pour former la grappe. Les parties de jonction peuvent être lissées à l'aide d'une spatule maintenue à la température normale. Le mercure est ensuite récupéré avant la coulée et débarrassé de ses impuretés éventuelles avant d'être réutilisé.

3. OUTILLAGES POUR LE MOULAGE EN GRANDE SÉRIE

Dans la fabrication de pièces en grande quantité, le moulage à la main sur modèle libre est remplacé par le moulage sur machine. Dans ce cas, le ou les modèles avec le dispositif de coulée (jet de descente, canaux et attaques de coulée) et d'alimentation (évents et masselottes éventuels) sont disposés et fixés sur le plan de joint de moulage. Celui-ci est matérialisé soit par une couche en plâtre ou en matière plastique, soit par une plaque en bois, en contreplaqué ou en métal. L'ensemble des outillages de moulage à la machine comprend les couches en plâtre ou en matière plastique et les plaques modèles.

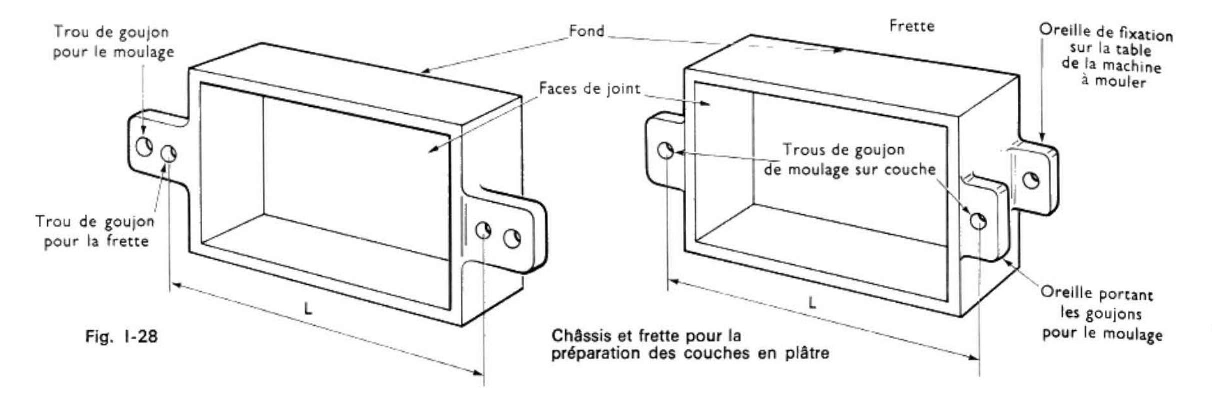


Fig. I-28

3.1. Préparation des couches en plâtre ou en matière plastique. — La préparation des couches en plâtre ou en matière plastique procède de la même technique, sauf si le remplacement fréquent des outillages en matière plastique justifie la création d'un faux moule permanent dans lequel ces couches seront coulées (comme les modèles du paragraphe 2.3.5, 4°).

3.1.1. Matériel nécessaire. — Ce matériel comprend :

1° Un jeu de deux châssis à double goujonnage; le premier goujonnage sert au repérage des deux châssis entre eux et le deuxième goujonnage permet de placer les frettes, dont le goujonnage a le même entraxe que les châssis de moulage. Ce deuxième goujonnage doit être parfaitement centré sur le premier afin d'éviter toute variation sur les pièces, lors de la mise en service des deux parties de la couche (fig. I-28).

2° Deux frettes ayant les dimensions des châssis de moulage et le même goujonnage, mais dont la hauteur est comprise entre 50 et 100 mm lorsque le joint de moulage est plan ; toutefois, si le joint est tourmenté, il faut prévoir une hauteur de frette suffisante pour obtenir une épaisseur minimale de 50 mm dans la partie la plus faible. Le goujonnage doit être particulièrement soigné et précis, car il sert ensuite pour le moulage.

3.1.2. Préparation de la couche (fig. I-29)

1° Les différents modèles prévus dans la composition de la couche, sont disposés avec leurs évents et leurs masselottes éventuels sur un marbre, lorsque le joint de moulage est plan, ou sur une fausse partie, en sable ou en plâtre, préfigurant grosso modo le joint de moulage si ce dernier est *décroché*.

2° Un des châssis à double goujonnage est mis en place, et du sable de moulage fin (*a*) est serré soigneusement et énergiquement sur le marbre ou la fausse partie et sur les modèles. Après serrage complet, le moule est retourné et le marbre est enlevé, ou la fausse partie détruite progressivement afin de conserver le joint de moulage intact. Ce joint est bien lissé, rectifié s'il y a lieu et saupoudré ensuite de produit isolant.

3° Un deuxième châssis est placé sur le premier et centré par les goujons. La deuxième partie (*b*) du moule est serrée comme la première et dès qu'elle est terminée,

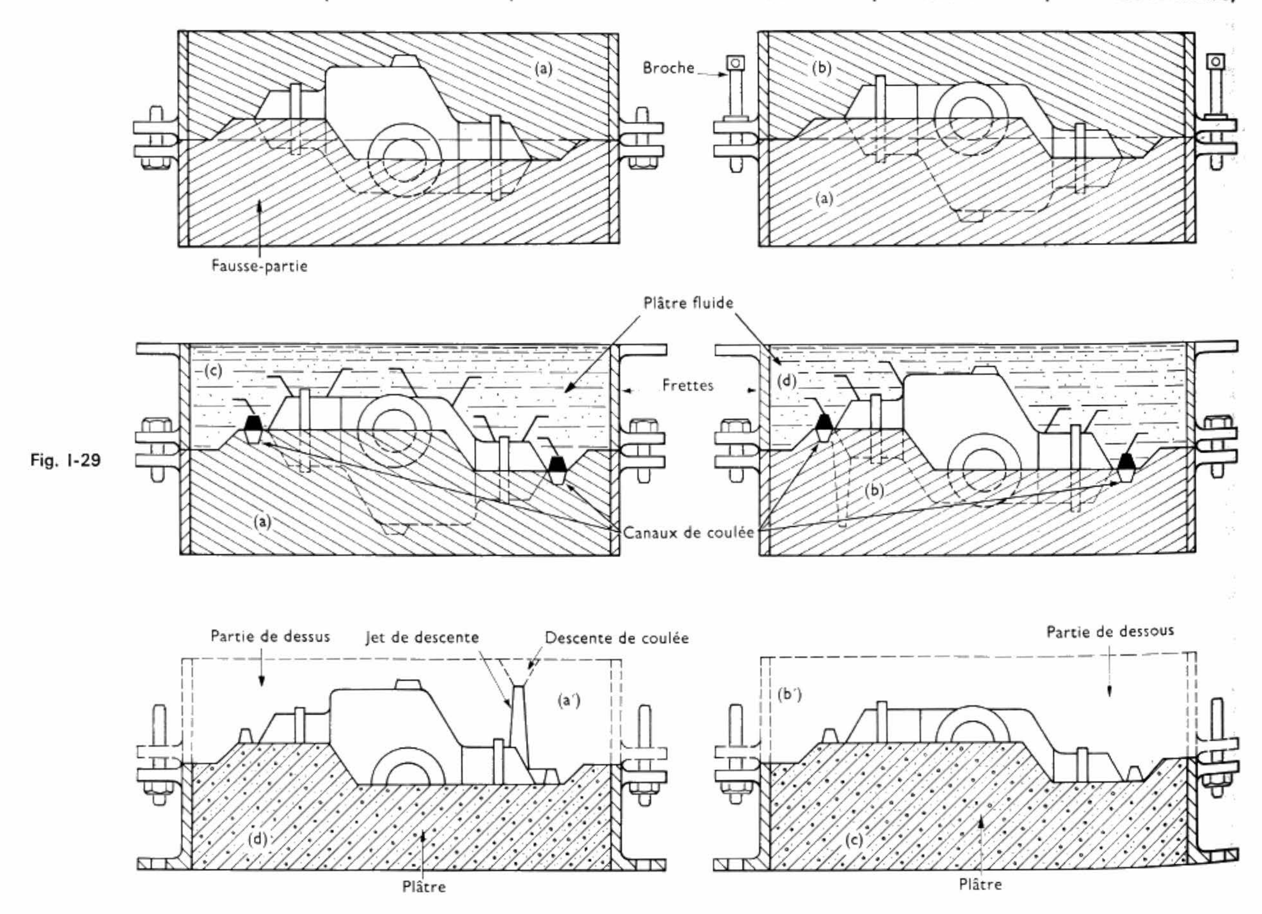


Fig. I-29

elle est démoulée. Si les modèles utilisés sont démontables par le joint de moulage, le démoulage de la deuxième partie n'offre pas de difficulté. Si les modèles sont d'un seul tenant avec un joint de moulage compliqué, après un léger ébranlage de la partie, le démoulage est réalisé en enfonçant progressivement de petits coins métalliques à chaque angle du châssis, de façon à décoller le moule des modèles sans provoquer de dégâts dans le sable du joint. Lorsque le moule est libéré de l'adhérence des modèles et après 10 à 15 mm de démoulage par coins, on l'enlève verticalement avec précaution afin d'éviter tout arrachement du sable.

4° Le jet de descente, les canaux et les attaques de coulée sont tranchés dans la partie adéquate. Les modèles sont démoulés et, si leur forme est trop fragile pour être reproduite en plâtre, ils sont remplacés dans l'empreinte par un modèle ou des parties de modèle en alliage blanc (généralement surmoulé sur le modèle mère) ainsi que le jet de descente. Sur ces parties, sont fixés des crochets à tige filetée ou des vis à grosse tête qui se trouveront noyés dans le plâtre de façon à relier parfaitement la partie métallique du modèle à la couche en plâtre. La matière plastique étant beaucoup plus résistante que le plâtre, des parties métalliques de modèle sont rarement rapportées sur les couches de cette nature.

5° Une frette est placée sur chaque partie de moule (*a*) et (*b*) ; elles sont repérées par les goujons et les bagues correspondantes des châssis à double goujonnage. Les joints extérieurs sont obturés à l'argile plastique afin d'éviter toute fuite de plâtre ou de matière plastique liquide. Par ailleurs, le plâtre est projeté sur l'eau par petite quantité et le tout est agité de façon à mélanger le plâtre à l'eau aussi intimement que possible, jusqu'à l'obtention d'une bouillie à consistance adéquate. Les proportions de plâtre et d'eau à respecter sont indiquées par les fabricants de plâtre afin d'obtenir, après la prise, le plâtre le plus dur possible. La bouillie est coulée dans la frette en ayant soin d'éviter la formation de bulles d'air, qui réduiraient la résistance de l'ensemble. Le moule peut être placé sur une table vibreuse qui facilite l'évacuation des bulles d'air. Lorsque le joint de moulage est atteint, on peut terminer le remplissage à l'aide d'un plâtre plus grossier dans lequel on incorpore des blocs provenant de la démolition de couches périmées afin de réduire la consommation de plâtre. On laisse le plâtre durcir pendant plusieurs heures (par exemple, pendant une nuit afin de ne pas perdre de temps).

6° Après la prise, le fond est réglé de façon à obtenir un plan parfait, puis la couche est retournée avec le moule et ce dernier est détruit avec précaution de façon à découvrir la partie en plâtre sans la dégrader. Le châssis à double goujonnage est enlevé ; la couche plâtre est lavée et les grains de sable adhérents soigneusement enlevés. Les retouches, s'il y a lieu, sont faites en plâtre fin moyennement humidifié. La couche sèche à l'air pendant deux jours environ. Parfois elle est ensuite placée durant quatre heures dans une étuve chauffée entre 100 °C et 130 °C.

Après séchage, la surface en plâtre est enduite de gomme laque ou d'un vernis cellulosique. On passe deux à trois couches successives, chacune après séchage et ponçage de la précédente ; la dernière n'est pas poncée.

Le séchage, l'étuvage et l'enduisage sont inutiles pour les couches en matière plastique qui sont utilisées après avoir subi un simple grattage, ayant pour but de faire disparaître les petites imperfections de surface qui pourraient gêner au démoulage.

3.2. Préparation des plaques modèles.

— La préparation des plaques modèles diffère selon la disposition du joint de moulage :

1° *Cas du joint de moulage plan.* — Les demi-modèles, repérés soigneusement par goujons, sont fixés par vis ou boulons sur une plaque en bois, lorsque la série de pièces est faible, ou sur une plaque métallique (en acier, en fonte ou en alliage d'aluminium), pour de grandes séries de pièces. Le dispositif de coulée est également fixé par vis sur la plaque.

2° *Cas d'un joint de moulage tourmenté.* — Lorsque le joint de moulage est tourmenté et difficile ou impossible à réaliser par usinage classique, les plaques-modèles complètes comprenant modèles, évents, masselottes, jets, canaux et attaques de coulée, ainsi que la plaque proprement dite, sont coulées d'un seul tenant. Puis elles sont retouchées au grattoir, polies et rectifiées après essai, s'il y a lieu.

3.2.1. Montage d'une plaque modèle à joint plan

1° *Plaque modèle double face* (fig. I-30). — Chaque face de la plaque modèle sert au moulage soit de la partie de dessous soit de la partie de dessus, de sorte que la plaque doit être retournée pour la confection d'un moule complet.

a) La plaque support (en bois ou en métal), nécessaire pour cette application, doit avoir les deux faces bien planes et parallèles. Elle est percée de deux trous (ou possède deux bagues) destinés à recevoir les goujons de centrage des châssis. Ses dimensions sont les mêmes que les longueur et largeur extérieures des châssis de moulage, avec des oreilles dans lesquelles sont percés les trous ou placées les bagues de repérage.

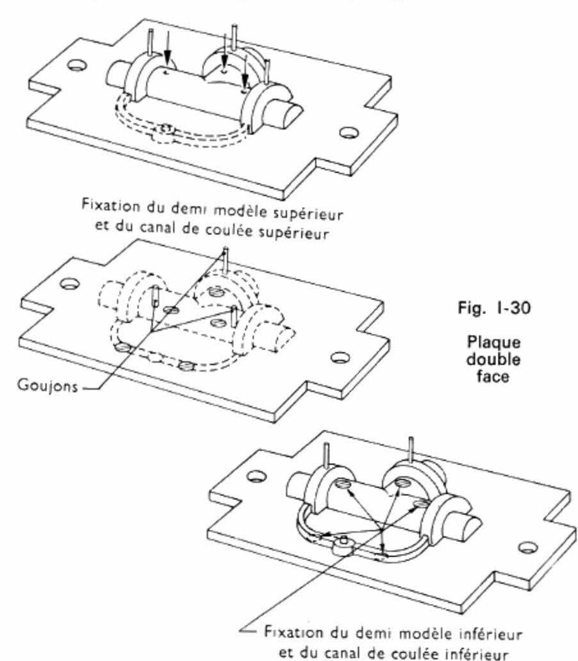


Fig. I-30
Plaque double face

b) Les modèles sont en deux parties, repérées par goujons et partagées par le plan de joint. La partie qui porte les goujons est appelée *mâle*, l'autre *femelle*.

c) La partie ou les parties femelles des modèles (sans goujon) sont disposées sur la plaque à l'intérieur d'un gabarit qui matérialise la surface du moule réservée aux modèles. On laisse au minimum 25 à 30 mm entre le modèle et la paroi du châssis.

d) À l'aide d'une perceuse, dont la table est rigoureusement perpendiculaire à l'axe de perçage, et en utilisant les trous de goujons des demi-modèles femelles comme gabarit de perçage, on perce la plaque de part en part. Les trous ont le même diamètre que ceux des goujons et l'on a bien soin de respecter l'emplacement choisi auparavant pour les modèles.

e) Les demi-modèles femelles sont maintenus à leur place à l'aide de goujons engagés dans la plaque. Dans le même temps, la plaque ayant été retournée et reposant sur des cales un peu plus hautes que les demi-modèles, on la perce de trous (dont le diamètre est choisi pour permettre le taraudage ultérieur des demi-modèles) ; ceux-ci sont prolongés jusque dans les demi-modèles femelles. Ces derniers sont ensuite démontés et taraudés. Les trous de la plaque sont agrandis à un diamètre légèrement supérieur à celui des vis de fixation à tête fraisée choisies, et l'emplacement des têtes est fraisé dans la plaque afin qu'elles puissent

s'y loger sans faire saillie. Les demi-modèles sont remis en place à l'aide des goujons et fixés à la plaque par les vis à tête fraisée dont le nombre dépend de l'importance des demi-modèles.

f) Les goujons provisoires, qui ont servi à placer les demi-modèles femelles, sont chassés de leur logement de la plaque. Les demi-modèles mâles (à goujons) sont mis en place sur la deuxième face de la plaque, et les goujons sont enfoncés à travers la plaque dans les demi-modèles femelles déjà fixés. On perce alors les demi-modèles femelles et la plaque; les trous doivent avoir un diamètre suffisant pour permettre un taraudage ultérieur dans les demi-modèles mâles. Ces derniers sont alors démontés et taraudés, pendant que les trous percés à travers les demi-modèles femelles et la plaque sont agrandis à un diamètre légèrement supérieur à celui des vis de fixation; les emplacements des têtes de vis sont fraisés dans les demi-modèles femelles. Les demi-modèles à goujons sont replacés, les goujons enfoncés comme précédemment, et les vis de fixation vissées sur les demi-modèles mâles. Puis on obture les trous de goujons et les emplacements des têtes fraisées des vis de fixation sur les demi-modèles femelles soit à la soudure à l'étain, soit au mastic cellulosique, soit avec de la matière plastique (ultérieurement on enlève l'excédent pour redonner la forme extérieure au modèle).

Remarque : Lorsque les demi-modèles sont en bois ou en alliage blanc, il est préférable, afin d'assurer la pérennité de la fixation, de visser les vis dans la plaque métallique préalablement taraudée car les secousses ou les vibrations des machines à mouler risqueraient de détériorer rapidement les taraudages dans le métal blanc ou le bois des modèles.

g) La plaque, sur laquelle ont été fixés les demi-modèles, doit être complétée par le dispositif d'alimentation :

— la descente de coulée et le cul-d'œuf placé à sa base (ou le logement du filtre de coulée) sont généralement tournés et en acier. Ils sont fixés solidement et solidairement, le jet dans la partie supérieure et le cul-d'œuf (ou le logement du filtre) dans la partie inférieure;

— les canaux et attaques de coulée, avec les masselottes éventuelles, sont ensuite placés pour relier le cul-d'œuf ou la base du filtre aux modèles à alimenter. La plupart du temps, ils sont placés dans la partie de dessous, sauf les masselottes, dont la fonction même exige qu'elles soient dans la partie de dessus.

Il est possible de préparer séparément canaux, attaques et masselottes puis de les ajuster et de les fixer par vis sur la plaque, comme les modèles, mais il est plus simple et beaucoup plus avantageux de procéder par coulée. Dans ce cas, avec du sable fin tamisé, on serre une partie de moule sur chaque face de la plaque. Ensuite ces deux parties sont démoulées avec soin (à l'aide de coins si le démoulage est délicat). On tranche alors les canaux et les attaques de coulée en général dans la partie de dessous (dans la partie de dessus si la forme des pièces l'exige), en partant du cul-d'œuf ou du filtre jusqu'à chaque modèle; les masselottes sont tranchées dans la partie de dessus.

Lorsque la plaque et les modèles sont métalliques et que les éléments du dispositif d'alimentation sont prévus en alliage blanc, on replace les parties de moule sur la plaque après avoir percé des descentes de coulée. On coule ensuite de l'alliage blanc dans ces descentes. Les éléments ainsi obtenus sont retouchés au grattoir, ajustés et polis, puis fixés par vis sur la plaque dont les trous sont taraudés.

Dans le cas de plaque ou de modèles en bois et d'éléments en alliage blanc, ou de plaque et de modèles métalliques et d'éléments en laiton ou en bronze on prolonge la durée en service du matériel en utilisant un procédé de coulée un peu différent. Après avoir bouché les empreintes des modèles avec du sable de moulage, les deux parties de moule sont placées l'une sur l'autre et l'alliage blanc, le laiton, ou le bronze, est coulé dans la descente de coulée. Afin de compenser le retrait du laiton ou du bronze, on tranche un supplément de canaux dans la partie de l'empreinte du modèle qui a été remplie de sable de moulage.

2° *Plaque modèle simple face* (fig. I-31). — Dans le cas de plaque modèle simple face, il faut une plaque pour exécuter les moules de la partie de dessus, et une seconde

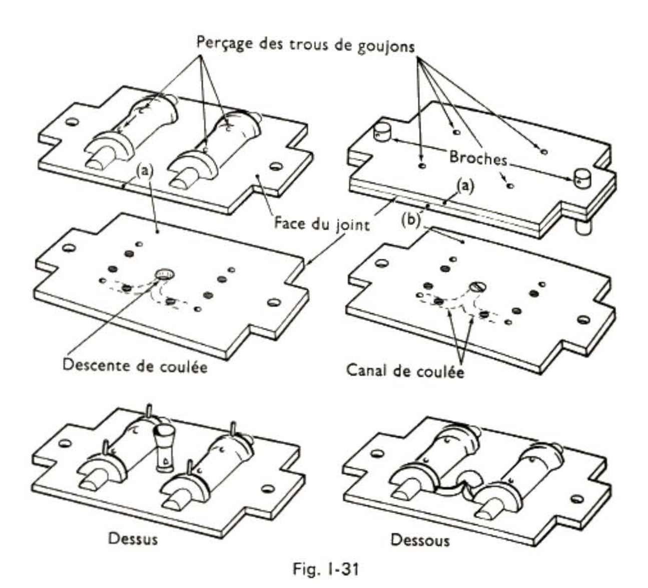


Fig. I-31

Plaque simple face. Fixation des modèles par vis

plaque pour le moulage de la partie de dessous. La préparation de ces deux plaques modèles simple face est un peu plus compliquée que celle des plaques modèles double face :

a) On dispose les demi-modèles dans la partie du gabarit réservé au moulage sur une plaque et l'on perce les trous de goujons dans cette plaque en utilisant les demi-modèles femelles comme gabarit de perçage.

b) On réunit les deux plaques en plaçant l'une contre l'autre les faces qui serviront de plan de moulage, les deux plaques étant parfaitement repérées par des goujons sans jeu.

c) La plaque, percée comme indiqué en *a* sert de gabarit de perçage pour la seconde; tous les trous de goujons sont alors percés.

d) Les plaques sont désaccouplées et les demi-modèles sont montés à leurs places respectives femelle sur la première plaque, mâle sur la seconde. Un repère bien en vue doit être rapporté sur le côté correspondant de chaque plaque. En général, il est placé près du goujon qui correspond à la bague ronde du châssis, lorsque la deuxième bague est ovale.

e) En ce qui concerne la coulée et la fixation des jets, canaux, attaques de coulée et masselottes, on opère comme dans le cas des plaques modèles double face mais séparément pour chaque plaque simple face. Le jet de descente est fixé sur la partie de dessus, le cul-d'œuf, ou le logement du filtre, dans la partie de dessous. On utilise la même méthode pour le perçage de trous de repère, face contre face.

3° *Plaque modèle réversible.* — La plaque modèle réversible est un cas particulier qui n'a d'intérêt que pour le moulage de pièces en petites séries. La même plaque permet de mouler la partie de dessus et la partie de dessous, une moitié de la plaque portant les demi-modèles de dessous et l'autre moitié, les demi-modèles de dessus. Le châssis de dessous est alors obtenu par retournement d'un châssis. Ainsi chaque demi-moule est tantôt un dessus, tantôt un dessous, symétriquement par rapport à l'axe formé par les deux goujons de repérage des châssis de dessus et de dessous.

La réussite de la plaque modèle dépend, d'une part, de la précision du traçage et, d'autre part, de la précision du perçage des trous de goujons par rapport au tracé. Le mode opératoire est simple :

a) L'axe de la plaque est tracé avec la plus grande précision possible en utilisant des goujons sans jeu disposés dans des bagues de repérage.

b) Sur la moitié de la plaque délimitée, d'une part, par l'axe tracé précédemment et, d'autre part, par le gabarit de moulage, on place les demi-modèles femelles. On les répartit aussi bien que possible, par rapport à cet axe

et également en tenant compte de l'emplacement de la descente de coulée et du mode de coulée du moule.

c) En utilisant les demi-modèles femelles comme gabarit de perçage, on perce la plaque de trous de goujons de même diamètre.

d) La plaque est ensuite placée verticalement et calée de façon que l'axe tracé initialement soit horizontal. Les trous de goujons des modèles sont tracés dans la deuxième demi-partie de la plaque vierge; par rapport à l'axe de la plaque ils occupent des positions symétriques de celles des trous de goujons précédemment.

e) Les trous tracés ci-dessus sont percés avec précision au diamètre des trous de goujons.

f) Les demi-modèles femelles sont placés dans la demi-partie percée initialement à l'aide de goujons et les demi-modèles correspondants, sont disposés symétriquement dans la demi-partie que l'on vient de percer.

g) Les demi-modèles sont fixés par vis, comme on l'a vu pour les plaques simple face, à travers la plaque pour les modèles métalliques en fonte, acier, bronze ou laiton, avec des vis fixées sur la plaque taraudée dans le cas de modèles en bois ou en alliage blanc.

h) Le jet de descente et le cul-d'œuf, ou le logement du filtre, sont tournés: le cul-d'œuf, ou le logement du filtre, porte un téton sur lequel viendra se placer le jet de descente démontable. Le cul-d'œuf, ou l'embase pour le filtre, est fixé sur l'axe de la plaque à l'emplacement adéquat.

i) Les éléments d'alimentation sont obtenus et montés comme précédemment (V. § 3.2.1, 1°, g).

j) La plaque est essayée: on moule deux parties avec précision, le moule est fermé et coulé avec un alliage blanc. Après refroidissement, on vérifie la conformité des parties ou on détermine les variations des parties de modèles. Lorsque la variation est faible, on peut retoucher les modèles afin d'obtenir des pièces sans trace de variation. Dans le cas d'une variation marquée, il faut mettre la plaque au rebut et la recommencer. Il est donc primordial d'effectuer un tracé et un perçage très précis, pour être à l'abri d'un rebut coûteux lorsque la plaque réversible est terminée.

3.2.2. Moulage d'une plaque modèle à joint tourmenté. — Lorsque le joint de moulage d'un modèle est très gauche et qu'il serait trop difficile, ou trop onéreux, de l'obtenir par usinage, la plaque modèle est obtenue par moulage et coulée en alliage léger, en alliage cuivreux, ou en fonte. Le choix dépend du mode de moulage futur. Lorsque le joint de moulage du modèle est trop *décroché* pour être raccordé au plan de joint d'un châssis de dimensions normales, on utilise des châssis spéciaux à deux ou plusieurs plans de joints. Cette technique est surtout utilisée dans le moulage en mottes, afin de limiter le poids des mottes (elles sont généralement transportées à la main de la machine à mouler au chantier de coulée ou sur le convoyeur).

1° *Moulage proprement dit.* — La technique du moulage est semblable à celle utilisée pour la reproduction des modèles métalliques:

a) Préparation d'une fausse partie dans laquelle le ou les modèles sont placés et sur laquelle le joint de moulage est délimité aussi exactement que possible.

b) Confection d'une partie de moule en utilisant du sable fin, tamisé, à cohésion élevée et soigneusement serré autour du ou des modèles et sur le joint de la fausse partie.

c) Après retournement de l'ensemble, destruction de la fausse partie de façon à ne conserver que la partie du moule contenant le ou les modèles en place. Le joint est rectifié soigneusement, bien lissé puis recouvert d'isolant de moulage aussi fin et aussi efficace que possible (talc, poudre de liège, d'infusoires, de lycopode, de diatomées, etc.).

d) Serrage de la deuxième partie du moule sur la première en prenant les mêmes précautions que précédemment et en utilisant le même sable. Éventuellement, les masselottes et leurs culs-d'œuf, les évents et leurs talons sont mis en place; les emplacements de la descente de coulée et des canaux sont tracés sur le joint.

e) Après ébranlage du ou des modèles (réalisé en transmettant, à travers le sable, les vibrations d'un appareil pneumatique ou électrique par l'intermédiaire de picots ou de tirefonds fixés sur chaque modèle) démoulage de la partie supérieure. Afin d'éviter de détériorer les parties fragiles du moule par un démoulage incorrect, on a recours à quatre coins métalliques. Enfoncés successivement et progressivement dans chaque angle entre les châssis, ils permettent de décoller le moule supérieur des modèles. Lorsque la séparation est jugée suffisante, le démoulage est terminé à la main pour les châssis de petites dimensions, ou à l'aide d'un appareil de levage lorsque le poids du moule est plus important. Les modèles sont ensuite enlevés de leur empreinte.

f) Taille des canaux de coulée dans le sable, en général dans la partie de dessous mais quelquefois également dans la partie de dessus (suivant la disposition particulière des modèles). Afin de faire coïncider le mieux possible les canaux des deux parties, avant de trancher les canaux de la partie supérieure, celle-ci est appuyée sur la partie inférieure préalablement saupoudrée de talc, dont les canaux sont déjà tranchés. Il faut tapoter légèrement sur le sable du moule supérieur afin de bien assurer le contact des faces de joints et de faire adhérer le talc sur le joint de la partie supérieure. Après séparation des deux parties, les canaux sont tranchés dans la partie supérieure en suivant les contours dessinés par le talc sur le joint.

g) Délimitation du contour extérieur de la plaque modèle par rapport au châssis. Le processus utilisé diffère selon l'alliage choisi pour la coulée de la plaque modèle:

— *Plaques modèles en alliages légers:* afin d'accélérer la solidification et d'affiner le grain (de façon à conférer à l'alliage une meilleure résistance), il est avantageux de délimiter le contour extérieur de la plaque modèle à l'aide d'un cadre, ou de règles en fonte ou en acier, les dispositifs sont maintenus en position par les goujons de centrage des châssis de moulage.

— *Plaques modèles en alliages cuivreux ou en fonte:* la forme de la plaque est obtenue par moulage d'un modèle en bois ou en métal placé sur le plan de joint et maintenu en position à l'aide des goujons des châssis. Le sable est serré soigneusement autour du modèle de la plaque. La coulée et les attaques sont tranchées à l'extérieur. La descente est percée dans la partie la plus favorable du

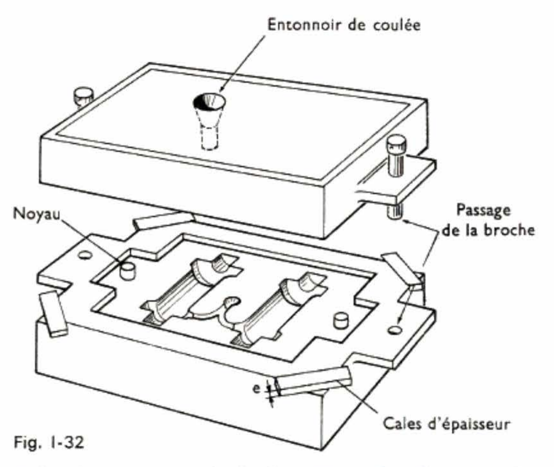


Fig. I-32

moule. Au moment de la fermeture des deux parties du moule, des cales métalliques de même épaisseur que le modèle de la plaque doivent être interposées entre les châssis, aux quatre angles, afin d'éviter l'écrasement du joint (fig. I-32). La suite du processus diffère par certains détails suivant les plaques modèles à obtenir.

2° *Moulage de plaques modèles double face.* — Dans la préparation des plaques modèles double face, la technique précédente, relative à la coulée en alliage léger, est la seule appliquée car, la plupart du temps, les plaques

modèles seront démoulées à la main et, pour cela, doivent être aussi légères que possible. L'épaisseur de la plaque doit être prévue de façon à lui conférer la rigidité nécessaire pour le moulage ultérieur.

Certaines plaques modèles comportent des masses importantes qu'il faut évider. En effet, cela permet d'une part, d'éviter les déformations découlant de la solidification de l'alliage et, d'autre part de réduire le poids total de la plaque modèle et donc d'en faciliter le maniement. Pour cela, on prépare des noyaux de façon à laisser une épaisseur régulière de parois de 10 à 15 mm et l'on prévoit une portée de noyaux dans la partie de dessus pour permettre le dégagement des gaz. On la place dans une surface plane si possible, afin de l'usiner et de l'obturer facilement sur le modèle. Avant cette opération, les parties noyautées sont vidées soigneusement de leur sable. Les surfaces des parties de modèles et du dispositif de coulée sont ensuite grattées afin de supprimer les petites rugosités et de corriger éventuellement les parties en contre-dépouille, dues aux imperfections de moulage. On termine par un polissage. Les joints de moulage sont conservés bruts de coulée, ou sont légèrement retouchés s'ils ont une surface trop rugueuse. Cela évite la formation d'une bavure au moment de la coulée des pièces. Les dispositifs de centrage sont fixés, réglés avec les châssis en place, puis la plaque est essayée. Un moule est serré aussi soigneusement que pour la confection de la plaque et coulé ensuite en alliage blanc ; suivant le résultat obtenu, la plaque est livrée ou rectifiée avant d'être utilisée pour le moulage.

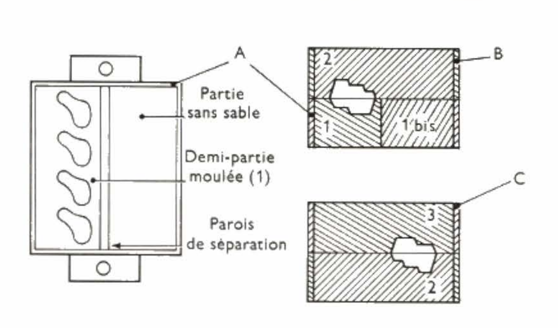
Lorsque les deux plaques modèles sont déballées et sablées soigneusement, la face inférieure est dressée par rabotage ou fraisage, puis elles sont toutes deux grattées, retouchées et polies dans les parties modèles et dispositifs de coulée et d'alimentation. Les deux plaques sont ensuite placées dos à dos et fixées solidement l'une à l'autre après avoir fait coïncider les axes « venus » de fonderie (quelquefois les axes sont tracés après coulée en utilisant les modèles). Les logements des bagues et des trous de goujons qui serviront au centrage des châssis pour le moulage sont tracés avec précision et percés en même temps sur les deux plaques modèles, à l'aide d'une perceuse (au préalable on a vérifié la perpendicularité de la table et du foret). Les bagues et les goujons sont placés dans leur logement, les moules d'essai sont serrés soigneusement sur chaque partie et le moule est coulé en alliage blanc. Les retouches éventuelles sont effectuées et lorsque la grappe en alliage blanc est parfaite, les plaque modèles sont livrées à la fabrication.

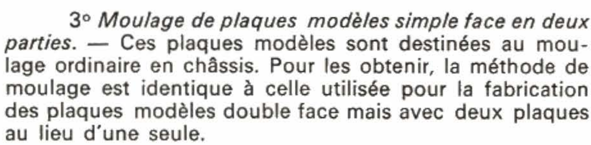
4° *Moulage de plaques modèles réversibles.* — Le châssis utilisé pour la coulée des plaques réversibles est partagé suivant l'axe de symétrie choisi, à l'aide d'une planchette ou d'une tôle :

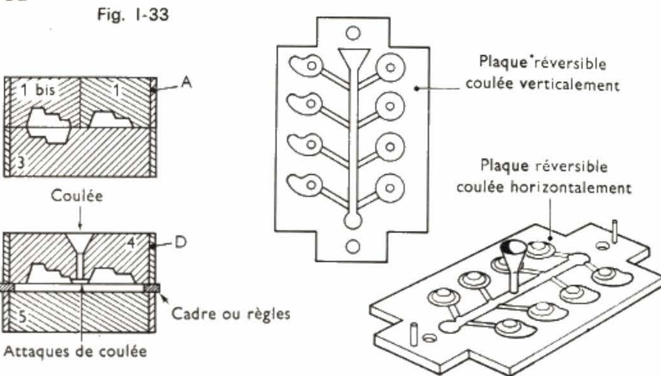
— dans le sens longitudinal, lorsque les moules sont coulés verticalement en presse ;

— dans le sens longitudinal ou le sens transversal, lorsque les moules sont coulés à plat.

Fig. I-33







3° *Moulage de plaques modèles simple face en deux parties.* — Ces plaques modèles sont destinées au moulage ordinaire en châssis. Pour les obtenir, la méthode de moulage est identique à celle utilisée pour la fabrication des plaques modèles double face mais avec deux plaques au lieu d'une seule.

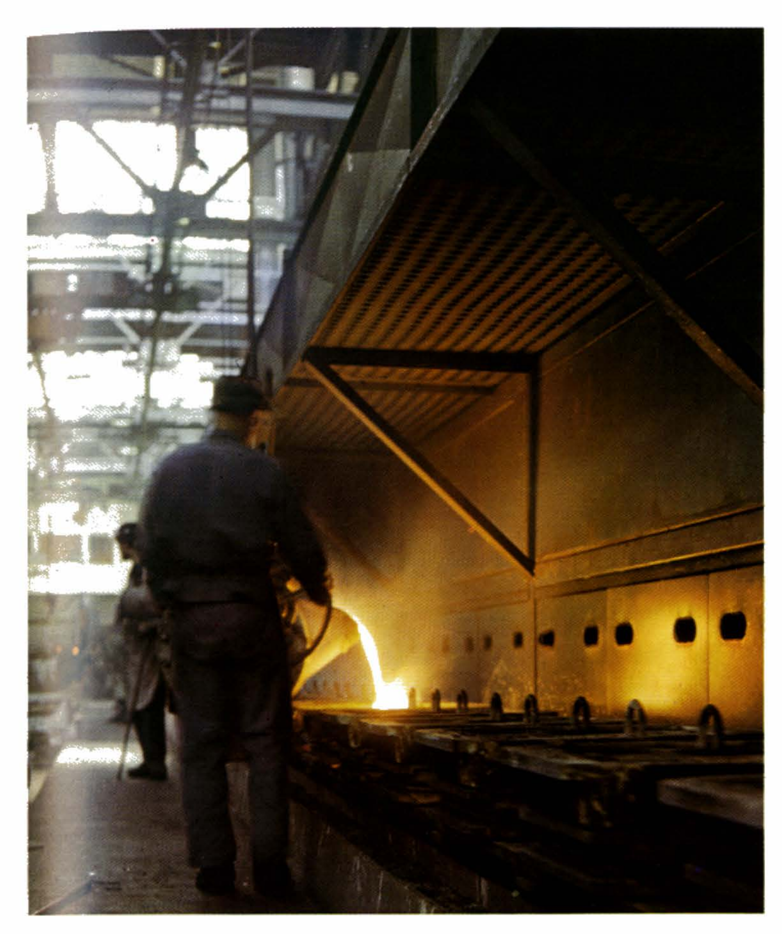
Lorsque les deux parties de moule sont démoulées, on serre sur chacune d'elles, modèles en place, une partie supplémentaire. Les parties massives des modèles sont évidées à l'aide de noyaux sur lesquels on taille l'épaisseur des parois verticales ou inclinées que l'on désire, les parois horizontales ayant l'épaisseur de la plaque proprement dite. Dans certains cas, des contreparties sont coulées en plâtre, modèles enlevés, de façon à serrer des demi-moules en sable sur lesquels les corrections d'épaisseur sont effectuées.

Le dispositif de coulée est tranché dans la partie choisie (le dessous en général,). Si, les plaques sont coulées en alliage léger, on interpose un cadre représentant le modèle de la plaque de base, entre la partie de dessus et la partie de dessous. Ce cadre est centré sur les goujons de châssis et porte les axes de la plaque gravés qui doivent apparaître sur la plaque modèle coulée.

Lorsque les plaques modèles sont coulées en fonte ou en alliage cuivreux, il faut placer le modèle de plaque sur la partie de dessous (le modèle est en général un cadre, centré sur les goujons des châssis et sur lequel les axes de la plaque sont gravés). Le sable est serré autour du cadre jusqu'aux contours du châssis. Le cadre enlevé, le moule est complété par une descente de coulée et les canaux et attaques de coulée de la plaque modèle. On place des cales d'épaisseur aux quatre angles des châssis afin d'éviter l'écrasement du joint, et les deux parties sont remoulées et prêtes à recevoir l'alliage à couler (fig. I-32).

La demi-partie (1) du châssis (*A*) est moulée en plaçant les modèles sur une fausse partie, dans la position la plus favorable pour le mode de coulée choisi (vertical ou à plat). Ensuite, on coiffe cette demi-partie (1) d'un châssis (*B*) que l'on serre comme s'il s'agissait d'un moule complet (fig. I-33). Sur ce châssis (*B*) démoulé, avec les modèles dans leurs empreintes (2), on moule une partie (*C*) dont les empreintes (3) seront la réplique de (1). Après démoulage, on place le châssis (*C*) sous le châssis (*A*), de sorte que les empreintes (3) se trouvent situées en face de la partie libre de (*A*) que l'on a évidée. On complète le châssis (*A*) en moulant la demi-partie (1 bis) au-dessus de (3). On obtient alors une empreinte complète dont les modèles sont placés symétriquement par rapport à l'axe des goujons. On moule enfin une partie complète (4) dans le châssis (*D*) placé sur le châssis (*A*), les modèles étant en place dans les empreintes (1) et (1 bis), ainsi que le jet de coulée. Après démoulage de la partie (4), l'entonnoir de coulée est évasé et les différents accessoires (canaux, attaques, masselottes et évents) sont tranchés dans la partie (4). Des règles, de l'épaisseur de la plaque prévue, ou un cadre, donnant les dimensions de la plaque, sont interposées entre les parties du moule (4) et (5). Après crampage, on coule la plaque en alliage d'aluminium ou en alliage blanc. Les parties massives sont garnies de refroidisseurs afin d'éviter les déformations que la contraction de solidification de l'alliage pourrait provoquer sur les modèles.

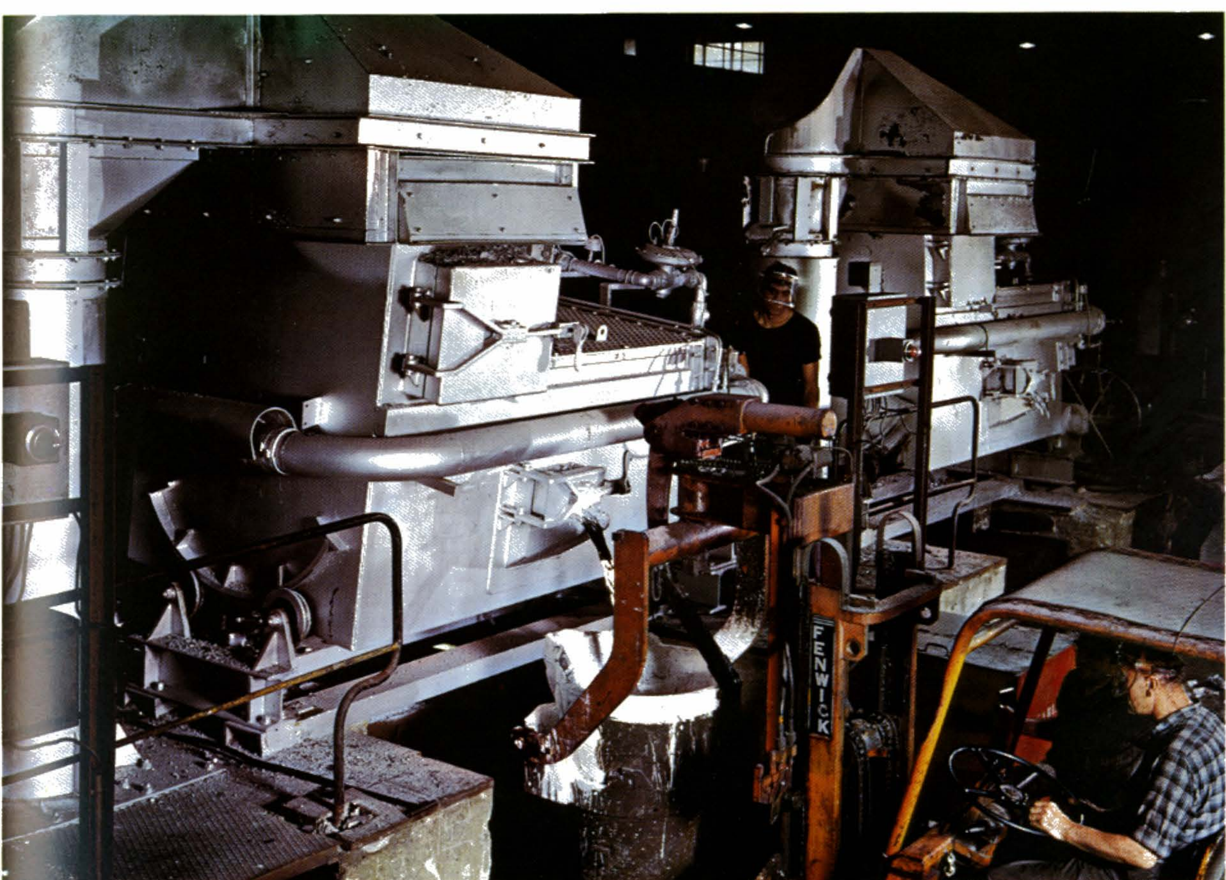
La plaque est ensuite retouchée, grattée et polie après refroidissement complet. Son axe de symétrie est tracé soigneusement et les logements des goujons sont percés avec précision. La plaque est essayée et, suivant le résultat



Fonderie

Ci-contre, opération de coulée dans l'un des moules d'une chaîne à la S.B.F.M. à Lorient.

Ci-dessous, fonderie d'aluminium à Cléon.



Photos : Renault.



Ci-dessus, meulage de roues de turbines hydrauliques en acier moulé.

Ci-contre, roue de turbine hydraulique en acier moulé.

Photos : Belzeaux-Creusot-Loire.

obtenu sur la grappe coulée en alliage blanc, elle est mise à la disposition de la fabrication, ou retouchée et rectifiée.

4. MOULAGE

4.1. Moulage en sable ordinaire

4.1.1. Généralités. — Lorsque le modèle est terminé, il faut exécuter un moule et couler l'alliage liquide choisi dans l'empreinte du moule.

Dans le moulage classique, la préparation du moule met en œuvre généralement :

— des châssis de moulage (en bois, en fonte, en acier, en alliage d'aluminium ou de magnésium) qui servent de contenant ;

— du sable de moulage constitué d'un mélange de sable siliceux, d'un agglutinant argileux et d'eau intimement malaxés, dans des proportions qui lui confèrent la cohésion indispensable pour permettre l'exécution du moule (cette cohésion est appelée aussi *corps à vert*).

Le sable préparé est serré aussi régulièrement que possible autour du modèle et plus énergiquement contre les parois du châssis. Après extraction du modèle, on obtient une empreinte suffisamment résistante et rigide pour conserver la forme et les dimensions du modèle et pour résister à l'action de l'alliage liquide (érosion et choc thermique).

Après refroidissement, la pièce est extraite du moule. Celui-ci est détruit et ne sert qu'une seule fois.

4.1.2. Différents modes de moulage au sable argileux ordinaire. — La consistance du moule résulte du serrage mécanique du sable (les grains sont tassés les uns contre les autres) et de l'action agglutinante de l'argile humidifiée qui maintient les grains collés les uns aux autres.

L'alliage liquide est coulé dans le moule qui peut être utilisé :

— soit tel qu'il est préparé : *c'est le moulage à vert ;*

— soit après séchage dans une étuve, ou bien, lorsque les dimensions ou le mode de moulage ne le permettent pas à l'aide d'appareils sécheurs mobiles : *c'est le moulage en sable étuvé ;*

— soit après un séchage superficiel rapide (obtenu à l'aide d'un courant d'air chaud ou d'une flamme de brûleur à combustible liquide ou gazeux) effectué immédiatement après le moulage et suivi de la fermeture du moule, puis de la coulée : *c'est le moulage en sable flambé ou grillé.* Cette dernière technique est généralisée dans la fabrication en grande série de pièces de petites et de moyennes dimensions comme les carters-cylindres de moteurs d'automobiles ou de camions.

Les sables utilisés dans ces trois modes de moulage ont des qualités très voisines. Pour certaines applications, dans le but d'améliorer le fini de la peau des pièces, d'éviter l'oxydation de l'alliage ou de faciliter le débourrage, aux trois constituants de base (sable siliceux-argile-eau) on ajoute divers ingrédients tels que de la houille pulvérisée, ou du brai, ou de la farine de bois, ou de la farine de silice, etc.

4.2. Étude des sables de moulage

4.2.1. Différents sables

1° *Sables naturels.* — Les sables propres au moulage, composés essentiellement de silice, d'argile, d'eau et de quelques impuretés, peuvent être trouvés à l'état naturel.

Cependant la recherche très aléatoire, les frais de transports lorsque les carrières sont éloignées et la préparation majorent sensiblement le coût des sables naturels, de sorte que leur emploi est en nette régression dans les fonderies importantes, comme d'ailleurs le moulage à la main qui en est le principal consommateur.

2° *Sables préparés, appelés « sables synthétiques ».* Afin d'obtenir une plus grande homogénéité et d'assurer des caractéristiques mécaniques constantes et aisément reproductibles, on préfère aujourd'hui préparer le mélange en utilisant du sable siliceux aussi pur que possible, de l'argile dont on connaît les propriétés agglutinantes et un pourcentage d'eau constant.

4.2.2. Propriétés du sable de moulage. — Pour satisfaire les exigences du moulage en grande série, le sable doit présenter les propriétés suivantes :

1° Il doit se serrer sans difficulté et d'une manière homogène : cette propriété découle de la *plasticité.*

2° Après serrage, lorsque le modèle est extrait du moule, le sable doit conserver les formes et les dimensions de l'empreinte laissée par le modèle : cette propriété est assurée par la *cohésion.*

3° Pendant la coulée de l'alliage liquide, pour conserver les formes et les dimensions de l'empreinte, le moule doit résister à l'érosion par le métal liquide et à l'action de la chaleur : cette propriété résulte de la conjonction de la composition chimique du sable, de sa cohésion et de son degré de serrage.

4° Dans le cas de coulée d'alliages à température élevée de fusion, le sable ne doit pas atteindre le début de fusion pâteuse (point de grésage) à la température d'équilibre à laquelle il est porté au contact de l'alliage : cette propriété dépend de ses qualités *réfractaires.*

5° Pendant le remplissage de l'empreinte, l'air et les gaz formés doivent pouvoir être évacués rapidement à travers le sable, afin que leur place dans l'empreinte puisse être occupée par l'alliage liquide et que les pièces soient saines : cette propriété dépend de la porosité du sable que l'on appelle la *perméabilité.*

6° Enfin, la surface des pièces (souvent appelée *peau*) doit avoir un fini satisfaisant. Cette propriété est liée à la grosseur des grains de silice du sable que l'on définit par l'*indice de finesse* ou *granulométrie.*

4.2.3. Constituants des sables de moulage

1° *L'eau.* — Sauf dans de très rares usines, l'eau ne fait l'objet d'aucun contrôle. Cependant, certaines impuretés (végétales, animales ou minérales) qu'elle contient risquent de perturber les qualités du sable. En particulier, il faut éviter de réutiliser des eaux de lavage qui pourraient contenir des produits nocifs ou dangereux, acides ou basiques.

2° *L'argile.* — C'est un silicate d'alumine hydraté. L'argile est blanche lorsqu'elle est pure ; elle est colorée, le plus souvent par de l'oxyde de fer, dans les sables de carrières. Elle contient une certaine quantité d'eau de formation (appelée aussi eau de combinaison ou combinée). Elle se présente sous forme de fines écailles hexagonales. Elle a la propriété d'absorber une grande quantité d'eau : le film d'eau s'insère entre les écailles et l'argile gonfle. Sous cette action lubrifiante, les écailles peuvent glisser les unes sur les autres, d'autant plus facilement que la quantité d'eau emmagasinée est importante. C'est pour cette raison qu'elles peuvent recouvrir les grains de silice du sable : cette propriété s'appelle la *plasticité.*

La plasticité optimale de l'argile correspond à un pourcentage d'eau précis qui dépend de la qualité de l'argile utilisée. Si l'on dépasse cette valeur, l'argile colle : elle a un « *pouvoir agglutinant* ».

Si l'on fait évaporer cette eau par chauffage à une température comprise entre 150 °C et 300 °C, l'argile refroidie ne retrouve sa plasticité et son pouvoir agglutinant qu'après une réhumidification.

Au contraire, si la température dépasse une valeur critique (variable suivant le type d'argile), l'argile perd son eau de formation (eau combinée) : elle est alors calcinée (brûlée, morte ou inerte) et il n'est plus possible de la régénérer par humidification (c'est ce que l'on recherche par la cuisson des poteries, briques, tuiles, etc.).

Dans un moule, le sable qui forme les faces de l'empreinte et qui est en contact avec l'alliage coulé, est porté à une température supérieure au point critique : l'argile de ce sable est calcinée et n'a aucune utilité pour la régénération du sable. Cependant, par suite notamment de la mauvaise conductibilité thermique du sable, la plus grande partie du moule n'atteint pas la température du point critique de

l'argile : celle-ci perd seulement l'eau de préparation et elle peut retrouver ses qualités initiales par addition d'eau.

Après chaque coulée, pour que le sable retrouve les qualités requises, il faut donc le régénérer. Ce travail doit être soigneusement contrôlé.

a) *Les variétés d'argile :* Les argiles peuvent être groupées en trois familles principales :

— Les argiles provenant de carrières naturelles dont la plus connue était la *montmorillonite* (du nom de la ville de Montmorillon dans la Vienne). Depuis l'épuisement de cette carrière et depuis la découverte d'argiles de qualité similaire près de Benton (États-Unis d'Amérique), on leur a donné le nom de *bentonites*. Certaines bentonites contiennent un peu de carbonate de sodium, ce sont les *bentonites sodiques;* d'autres contiennent du carbonate de calcium et sont appelées *bentonites calciques*. Les bentonites sodiques ont une meilleure résistance à chaud, tandis que les bentonites calciques présentent une meilleure résistance « à vert ».

— La *kaolinite* (dérivée du kaolin, utilisé dans la fabrication des objets en faïence et en porcelaine ; il doit son nom à une colline de Chine, Kao-ling près du lac de Po-yang) provient de la désagrégation du feldspath des granits ; aux États-Unis d'Amérique, elle est appelée *fire-clay*.

— L'*illite* qui provient de la désagrégation de certains schistes argileux.

b) *Utilisation des argiles :* Les grains de silice du sable doivent être entièrement recouverts d'argile pour que la cohésion du mélange soit optimale. Pour atteindre ce but, il est préférable de préparer d'abord le mélange argile-eau afin de développer sa plasticité optimale, et d'ajouter ensuite le sable siliceux. Le travail et le temps nécessaires pour l'enrobage des grains dans le malaxeur sont sensiblement réduits lorsque l'argile est ajoutée de cette façon.

La quantité d'eau nécessaire pour développer la plasticité optimale de l'argile doit être déterminée pour chaque qualité d'argile. On estime qu'elle est voisine de 25 % environ pour les bentonites sodiques ou calciques et de 15 % environ pour les kaolinites.

Pourcentage d'argile optimal : du point de vue économique, il est préférable de n'utiliser que la quantité d'argile strictement nécessaire pour conférer au sable la cohésion désirée.

Cependant, la cohésion à vert n'est pas le seul critère à considérer car elle ne permet pas d'éliminer certains défauts. En effet, dans un moule froid, avant la coulée, les grains de silice sont maintenus en place, d'une part, par leur coincement réciproque et, d'autre part, par l'action agglutinante de l'argile. Au contact de l'alliage liquide ou par l'effet du rayonnement, les grains de silice s'échauffent et diverses modifications se produisent. Il s'ensuit d'abord un léger accroissement de volume dû à la dilatation. Par ailleurs le quartz change de variété allotropique et subit une augmentation de volume concomitante beaucoup plus importante (vers 575 °C le quartz α se transforme en quartz β et son volume augmente de 0,7 % environ ; à 900 °C, le quartz β passe à l'état de tridymite, transformation qui s'accompagne d'une augmentation de volume de 14,2 % environ). En même temps il y a évaporation, en premier lieu de l'eau de préparation de l'argile et, en second lieu de l'eau de formation (eau combinée). Le volume de l'argile diminue (cette contraction est appelée aussi *retrait*).

Pour éviter toute perturbation dans l'empreinte du moule, il faudrait que la diminution de volume résultant de la dessiccation de l'argile compense l'important gonflement des grains de silice du sable. On obtient partiellement ce résultat en ajoutant un peu plus de bentonite que la quantité minimale nécessaire pour agglutiner les grains de silice. Dans de nombreux cas, on écarte ainsi les risques de défauts sur les pièces (queues-de-rat, galles ou dartres, etc.) ; défauts dus au mouvement superficiel des grains de sable de l'empreinte lorsqu'ils gonflent, principalement sur les grandes surfaces planes du moule.

Néanmoins, il ne faut pas tomber dans l'excès contraire car, bien que la température de fusion de l'argile n'ait qu'une influence très limitée, un excès d'argile peut être la cause d'un abaissement sensible de la température de début de fusion pâteuse (ou de grésage) du sable. Dans le cas de coulée d'alliages à température élevée de fusion, le point de grésage du sable pourrait être dépassé et, outre la perte importante d'argile par calcination, il pourrait s'ensuivre de graves difficultés au décochage et à la régénération du sable.

3° *Les sables siliceux.* — Ils doivent répondre à certains critères pour être aptes au moulage :

a) *La température de début de fusion pâteuse* doit être aussi élevée que possible (1 680 °C à 1 700 °C) car l'argile et les adjuvants qu'on incorpore au sable, abaissent sensiblement sa résistance pyroscopique ; dans le cas de sable pour la coulée d'acier ou de fonte malléable, la température de grésage doit être maintenue au-dessus de 1 370 °C à 1 400 °C. La couleur du sable est un indice éventuel de sa résistance pyroscopique : un sable bien blanc est exempt d'oxyde de fer et convient généralement ; au contraire, il faut rejeter tout sable coloré en jaune ou en rouge par l'oxyde de fer. L'analyse chimique renseigne sur la présence éventuelle d'éléments fondants. Les teneurs limites admissibles sont de 1 % pour la magnésie, 1 % pour la chaux et 2 % pour l'oxyde de fer.

b) *La forme du grain* a une importance majeure sur le comportement du sable pendant sa préparation, pendant le serrage du moule, pendant la coulée et au moment du décochage. L'expérience prouve que, pour une même granulométrie, les grains sphériques sont préférables aux grains anguleux. En effet, il faut moins d'argile pour les recouvrir, ils se serrent plus facilement, plus rapidement et d'une manière plus homogène ; ils donnent des interstices (ou pores) plus gros et plus réguliers et il s'ensuit une meilleure perméabilité. Ils ont moins tendance à gréser et ils usent moins les modèles. Pour toutes ces raisons, pour le moulage, on recherche des grains de silice dont la forme se rapproche de la sphère.

c) *La grosseur du grain :* lorsque les grains du sable se rapprochent de la forme sphérique, la grosseur du grain est l'élément déterminant de la perméabilité. En effet, dans un empilage de sphères de même diamètre, occupant un volume global déterminé, le total des volumes des interstices entre les sphères est constant et indépendant du diamètre de celles-ci (il représente environ 26 % du volume global) ; si le diamètre des sphères diminue, le nombre des sphères et des interstices augmente mais le volume de chacun d'eux diminue. Il en est de même pour le sable, lorsque la grosseur des grains est régulière. Aussi, l'air et les gaz formés pendant la coulée ont-ils d'autant plus de difficultés à s'échapper à travers les interstices que le diamètre de ces grains est plus faible : la perméabilité d'un sable à gros grains est meilleure que celle d'une sable à grains fins.

En outre, à volume global constant, un sable à grains fins nécessite plus d'argile et plus d'eau pour l'enrobage des grains. Dans le cas de coulée d'un même alliage, il se produit donc un dégagement de vapeur d'eau plus important dans un sable à grains fins que dans un sable à gros grains.

Par ailleurs, dans des moules préparés avec le même sable, l'importance du dégagement de vapeur d'eau et le risque de grésage augmentent avec la température de coulée de l'alliage.

Pratiquement on utilise des sables à gros grains pour la coulée des alliages à température de coulée élevée et pour les pièces de forte épaisseur. On réserve les sables à grains fins à la coulée d'alliages à basse température et pour des pièces de faible épaisseur, coulées avec des alliages à température de coulée élevée.

d) *Étude de la granulométrie :* la méthode préconisée par l'*American Foundrymen's Society* (Société des fondeurs américains) a été adoptée en France pour la détermination de la grosseur moyenne du sable, que l'on appelle aussi *indice de finesse* ou *granulométrie*. Dans cette méthode, après un lavage soigné destiné à le débarrasser de l'argile et des impuretés, le sable est séché dans une étuve dont la température est maintenue à 110 °C environ. Une masse déterminée de sable sec tout venant (20 g ou

Numéro d'ordre	Numéro du tamis ou nombre de mailles au pouce carré	Ouverture de la maille en millimètres	Multiplicateur Numéro du tamis précédent	Exemple 1		Exemple 2		Exemple 3	
				Masse des refus	Produits	Masse des refus	Produits	Masse des refus	Produits
1	3	6,720	—	0	—	0	—		
2	6	3,360	3	0	—	0			
3	12	1,680	5	0	—	0	—		
4	20	0,840	10	0	—	0	—		
5	30	0,590	20	3	60	3	60	2	40
6	40	0,420	30	6	180	7	210	8	240
7	50	0,297	40	12	480	15	600	25	1 000
8	70	0,210	50	30	1 500	22	1 100	21	1 050
9	100	0,149	70	33	2 310	20	1 400	23	1 610
10	140	0,105	100	11	1 100	16	1 600	14	1 400
11	200	0,074	140	2,5	350	12	1 680	5	700
12	270	0,053	200	2,0	400	4	800	2	400
13	fond	fines	300	0,5	150	1	300	0	—
Totaux				100,0	6 530 ↓	100,0	7 750 ↓	100,0	6 440 ↓
Indice de finesse ou granulométrie					65		78		64

(1 pouce carré = 6,451 cm². Les masses des refus sont exprimées en grammes).

100 g) est tamisée à l'aide d'une série de douze tamis dont les nombres de mailles au pouce carré sont indiqués sur le tableau ci-dessus. Le sable arrêté par un tamis n° 7, par exemple, et appelé *refus au tamis* 7, est pesé (on admet que le diamètre du grain de sable refusé sur le tamis *X* correspond à l'ouverture de maille du tamis précédent *X*-1). On établit l'histogramme correspondant (fig. I-34).

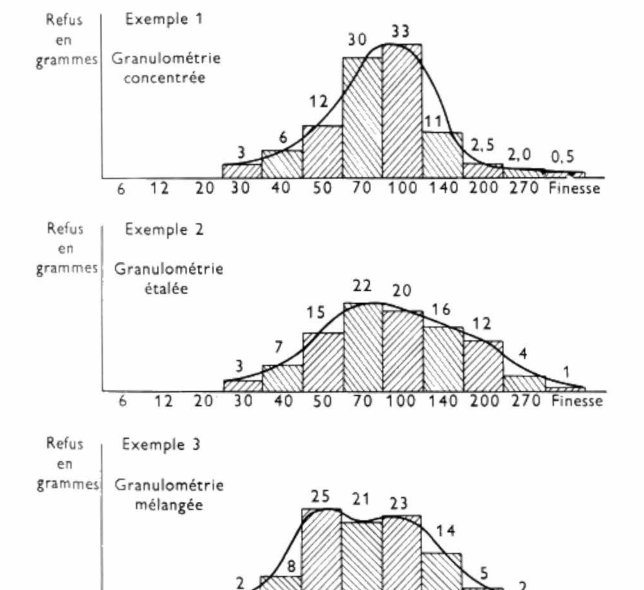


Fig. I-34

Lorsque la somme des masses des refus sur deux tamis consécutifs dépasse 50 % de la masse totale, la granulométrie est dite *concentrée* (Ex. 1). Dans les autres cas, elle est dite *étalée* (Ex. 2). La granulométrie d'un sable résultant du mélange de deux sables extraits de deux veines différentes d'une carrière est généralement étalée ou présente deux maximums sur l'histogramme (Ex. 3).

L'indice de finesse est le rapport de la somme des produits des refus par le numéro du tamis précédent à la masse totale de sable tamisé :

$$\text{Indice de finesse (ou granulométrie)} = \frac{\Sigma \text{ (masse du refus multiplié par n° du tamis précédent)}}{\text{masse totale du sable tamisé}}$$

4.2.4. La cohésion des sables de moulage. — La cohésion à vert d'un sable est déterminée par la résistance à la compression d'une éprouvette de forme cylindrique ($\varnothing = h = 50$ mm en Europe, 2 pouces aux États-Unis d'Amérique). Cette éprouvette est préparée à l'aide d'un tube d'un diamètre intérieur de 50 mm et serrée sur un damoir muni d'une masse de 6,670 kg que l'on fait tomber trois fois d'une hauteur constante. La tige du piston porte un repère qui doit coïncider, après serrage de l'éprouvette, avec celui porté sur le bâti du damoir (cependant on admet une tolérance de $\pm$ 1 mm). Le sable à essayer est pesé : 150 g pour le premier essai, puis, suivant la hauteur de l'éprouvette obtenue, on enlève ou on ajoute quelques grammes de sable, pour que, finalement, l'éprouvette ait une hauteur comprise entre deux repères extrêmes (fig. I-35).

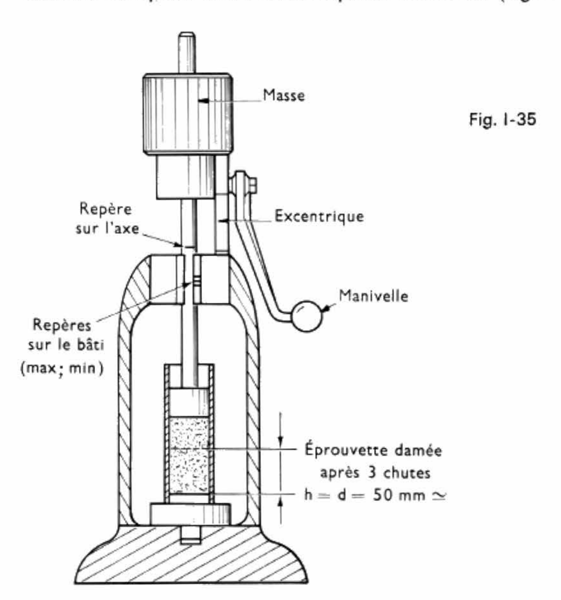


Fig. I-35

L'éprouvette, extraite du tube, est placée sur l'appareil à déterminer la cohésion (fig. I-36, page suivante) et soumise à la compression du piston mobile. Lorsque l'éprouvette se rompt, la pression indiquée sur le manomètre correspond à la résistance à la compression de l'éprouvette.

La cohésion d'un sable varie en fonction des teneurs en argile et en eau. Pour chaque teneur en argile (4, 6, 8, 10 %, etc.) on détermine les cohésions obtenues avec des

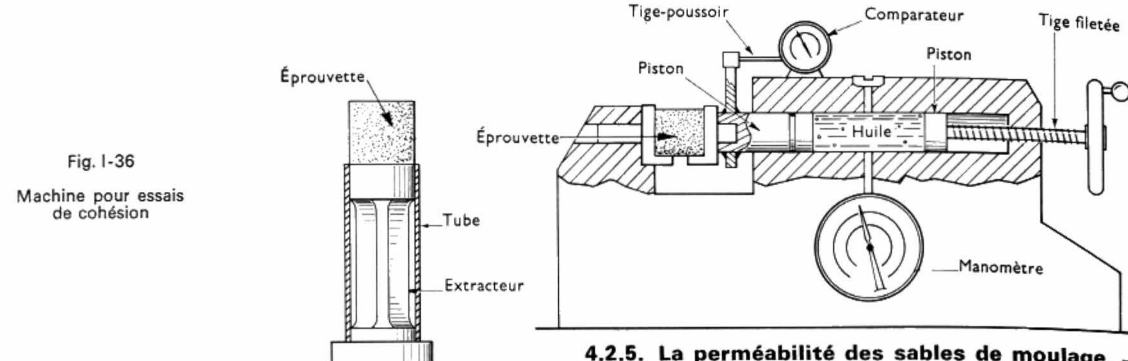


Fig. I-36
Machine pour essais de cohésion

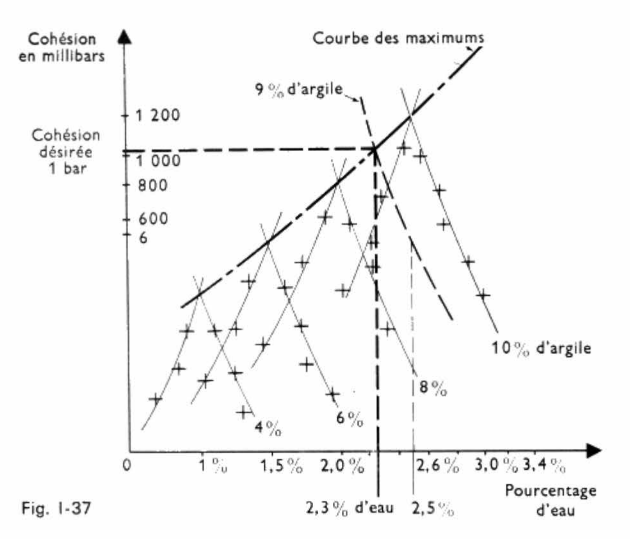


Fig. I-37

teneurs en eau croissantes de 1 à 4 % et on trace les courbes correspondantes (fig. I-37). On trace ensuite la courbe des maximums qui permet de préjuger de la composition du sable à employer lorsque le moulage exige une cohésion déterminée (dans l'exemple choisi : 1 bar avec 9 % d'argile et 2,3 % d'eau).

Comme le sable subit une légère perte d'eau par évaporation avant son utilisation, on adopte, généralement, une teneur en eau de 0,2 à 0,4 % supérieure à celle indiquée sur le graphique. Ainsi la cohésion augmente quand l'eau s'évapore légèrement.

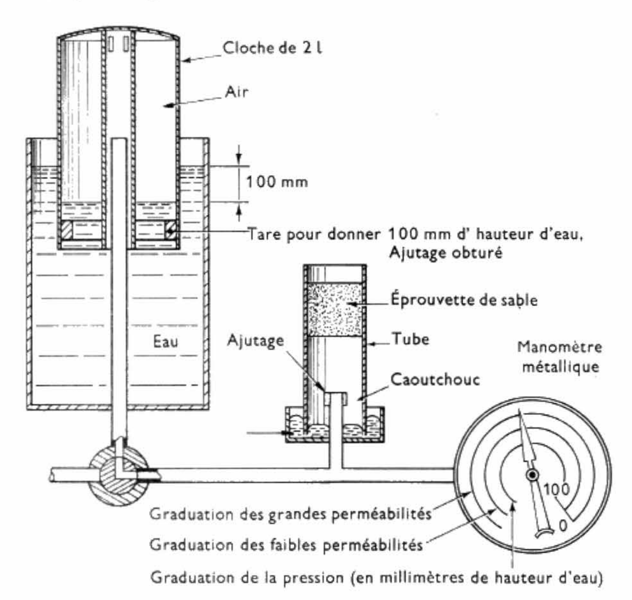


Fig. I-38

4.2.5. La perméabilité des sables de moulage. — La perméabilité d'un sable est déterminée au moyen de l'éprouvette de 50 mm utilisée pour l'étude de la cohésion, avant son extraction du tube dans lequel elle est serrée.

Le *nombre de perméabilité* correspond au temps nécessaire pour le passage de deux litres d'air à travers l'éprouvette (à la température ambiante et sous la pression constante d'une cloche tarée pour donner une pression statique de 100 mm d'eau avec tous les orifices bouchés). Comme l'orifice équivalent de l'éprouvette est constant, il suffit de mesurer la pression entre l'ajutage et l'éprouvette. Le manomètre de l'appareil est gradué en nombres de perméabilité (fig. I-38).

Les résultats de l'essai de perméabilité sont traduits graphiquement par des courbes qui ont la même allure que celles de cohésion ; de plus, le maximum correspond au même pourcentage d'eau que le maximum de la courbe de cohésion pour des sables de même teneur en argile. Cette concordance est la conséquence de la modification de la grosseur du grain enrobé d'argile lorsque la teneur en eau varie. L'argile gonfle au fur et à mesure que la teneur en eau augmente. Parallèlement, le grain enrobé augmente de volume progressivement. Au moment du serrage, le grain enrobé d'argile résiste sans se déformer à l'action du damoir tant que la plasticité de l'argile peut supporter la pression ; en même temps la perméabilité augmente. Lorsque la teneur en eau est trop grande, l'argile devient trop plastique et l'enrobage du grain se déforme sous l'action du damoir ; les interstices entre les grains s'obturent alors progressivement et la perméabilité diminue rapidement (fig. I-39 et I-40).

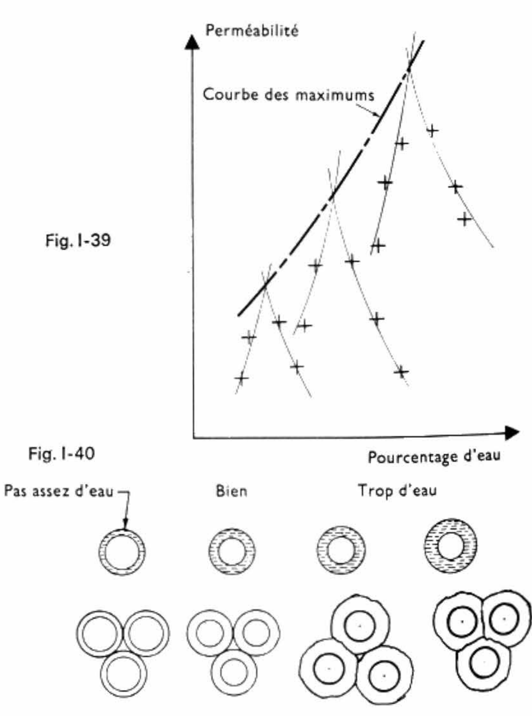


Fig. I-39

Fig. I-40

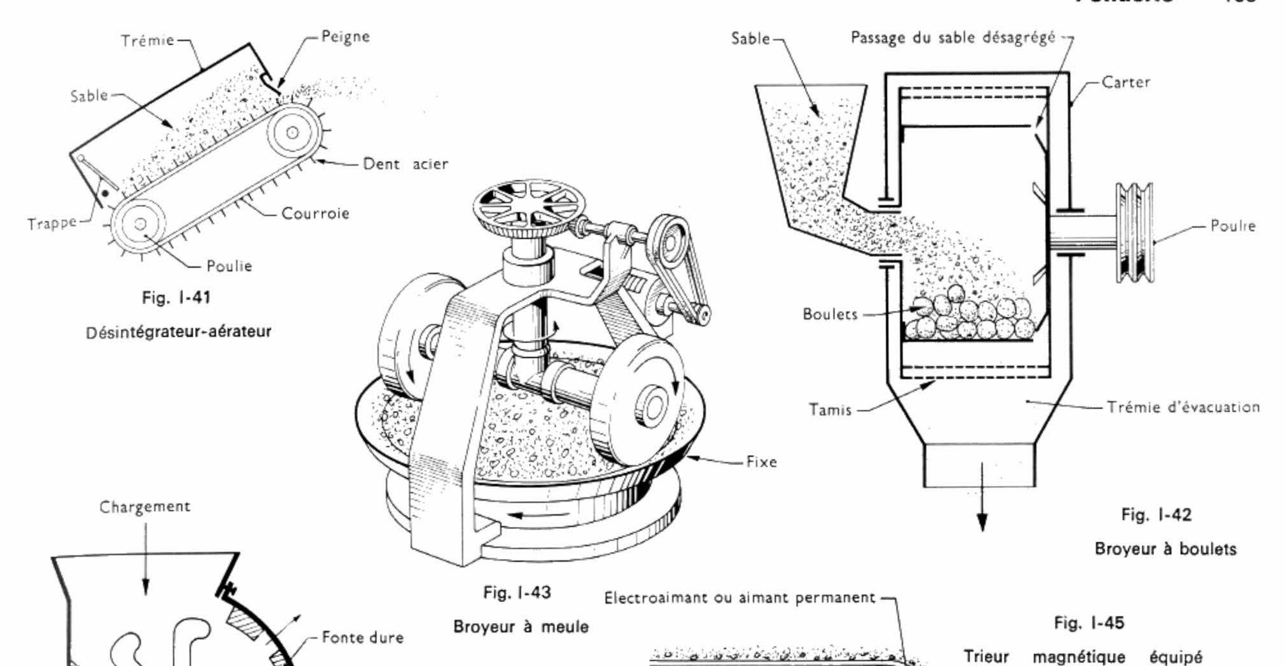


Fig. I-41
Désintégrateur-aérateur

Fig. I-43
Broyeur à meule

Fig. I-42
Broyeur à boulets

Fig. I-44
Broyeur à marteau

4.2.6. Préparation des sables. — À chaque coulée, une partie de l'eau de préparation du sable s'évapore et l'argile du sable en contact avec la pièce perd son eau de constitution et devient inutilisable (l'argile est calcinée ou morte). Il faut régénérer le sable par une addition d'argile vierge et d'eau (celle nécessaire à l'argile vierge pour atteindre son pouvoir agglutinant optimal et celle qui doit remplacer l'eau de préparation évaporée). Cette régénération est obtenue par malaxage du sable afin de répartir autour des grains de silice, aussi régulièrement que possible, l'eau et l'argile ajoutées.

Les proportions d'argile à remplacer et d'eau à ajouter dépendent des conditions de fabrication, de l'alliage coulé, des dimensions et de la grosseur des pièces fabriquées, de la masse totale de sable en circulation. Il faut adapter cette régénération à chaque fabrication.

1° *Appareils utilisés pour la préparation du sable :*

a) *Les aérateurs :* dans certaines fonderies la régénération du sable se fait sur le sol de la fonderie : le vieux sable est étalé puis on ajoute l'argile vierge et l'on arrose le tout. En général le sable repose ainsi toute la nuit et il est repris le lendemain, à la pelle. On le passe alors dans un appareil (désintégrateur-aérateur à courroie sans fin munie de dents en acier, fig. I-41) qui régularise l'humidité et divise le sable. Cet appareil est quelquefois monté à la sortie d'un moulin.

b) *Les broyeurs :* ces appareils sont surtout utilisés pour briser les mottes ; on distingue les broyeurs à boulets (fig. I-42), les broyeurs à meules (fig. I-43) et les broyeurs à marteaux (fig. I-44).

c) *Les trieurs magnétiques :* dans les fonderies de fonte, ils sont destinés à séparer les bavures et déchets ferreux du sable. Il en existe deux types : les *poulies magnétiques* qui se placent en bout d'une courroie transporteuse (fig. I-45), et les *over-bands*, courroies sans fin, munies de barrettes, qui tournent au-dessus de courroies transportant du sable dans le champ d'un aimant (celui-ci attire les déchets ferreux que les barrettes entraînent hors du circuit du sable, fig. I-46).

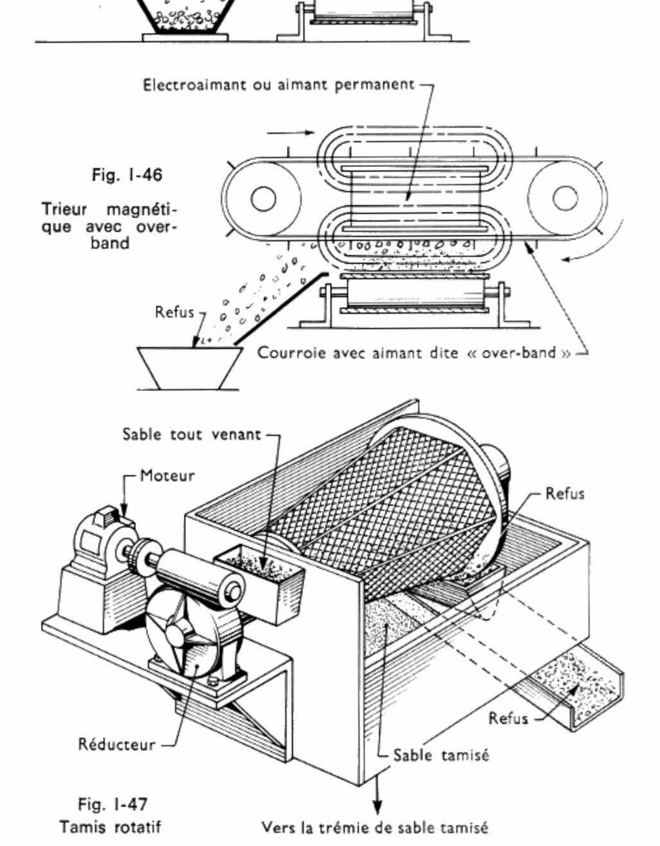


Fig. I-45
Trieur magnétique équipé d'une poulie magnétique

Fig. I-46
Trieur magnétique avec over-band

Fig. I-47
Tamis rotatif

d) *Les tamis :* ils sont utilisés pour éliminer les mottes de sable brûlé (provenant du moule ou des noyaux). On emploie des tamis rotatifs (fig. I-47) ou des tamis vibrants (pneumatiques, électriques ou mécaniques ; fig. I-48). Les refus sont envoyés hors du circuit du sable.

Fig. I-48
Tamis vibrant

Fig. I-49
Moulin frotteur à cuve mobile à circuit de sable centrifuge

Fig. I-50

Fig. I-51
Moulin frotteur à cuve fixe et à meules tournantes verticales

e) *Les moulins :* appelés aussi broyeurs-frotteurs, ces appareils comprennent une cuve et des meules qui tournent sur le sable à préparer. Comme les meules tournent autour d'un axe qui est perpendiculaire à celui de la cuve, il y a glissement ou frottage du sable sous la meule, d'où le nom de *frotteurs.* On peut classer ces appareils en trois catégories :

— *Les moulins frotteurs continus à cuve mobile* dont les axes des meules sont fixes.

● Le circuit du sable peut être centrifuge : le sable à préparer arrive au centre et des raclettes le soulèvent devant des meules pour l'évacuer finalement par l'extérieur de la cuve (fig. I-49).

● Le circuit du sable peut être centripète : l'arrivée du sable à préparer se trouve vers l'extérieur de la cuve et les raclettes, tout en retournant le sable devant les meules, l'obligent à passer de l'extérieur vers le centre de la cuve où il est évacué (fig. I-50).

— *Les moulins frotteurs, discontinus ou continus, à cuve fixe et à meules tournantes verticales* dont les axes horizontaux sont solidaires de bras rotatifs (fig. I-51).

— *Les moulins frotteurs discontinus à cuve fixe et à meules tournantes horizontales* dans lesquels les meules tournent horizontalement et sont appliquées sur les parois latérales de la cuve par inertie centrifuge, de même que le sable qu'elles entraînent. La cuve et les meules sont revêtues de caoutchouc (fig. I-52).

f) *Les appareils spéciaux :* il existe aussi un ensemble spécial, placé directement sur la courroie transportant le sable, composé d'un dispositif d'arrosage et de soufflage, pour refroidir le sable, et d'une série de trois cages d'écureuil qui ont pour but de mélanger et d'aérer le sable après son humidification (fig. I-53, page suivante).

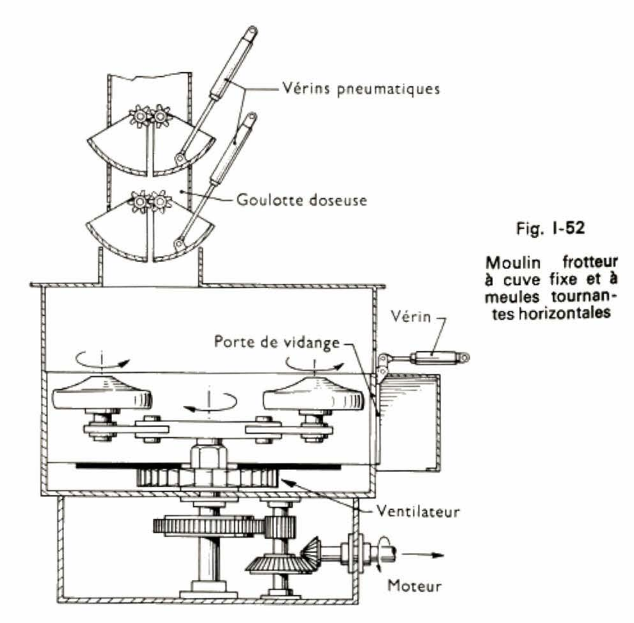


Fig. I-52

Moulin frotteur à cuve fixe et à meules tournantes horizontales

2° *Contrôle de l'humidité du sable.* — La teneur en eau du sable doit être maintenue entre deux limites assez rapprochées. Aussi le contrôle de l'humidité doit-il être effectué régulièrement. La mesure de la teneur en eau peut être réalisée en continu, à l'aide d'appareils électroniques (ils comprennent notamment deux sondes qui

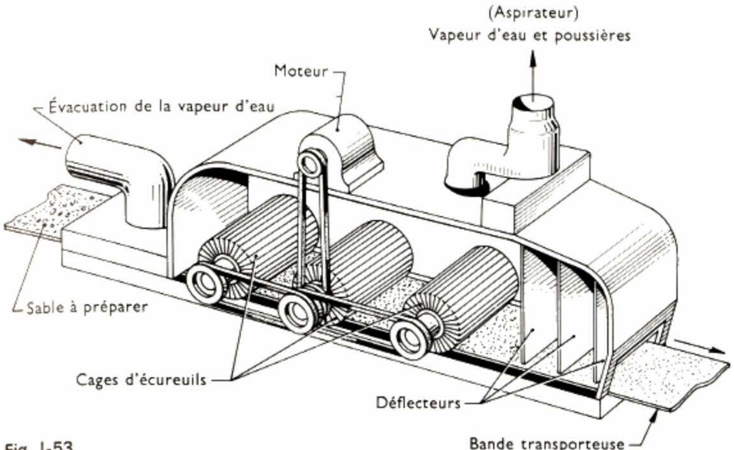


Fig. I-53

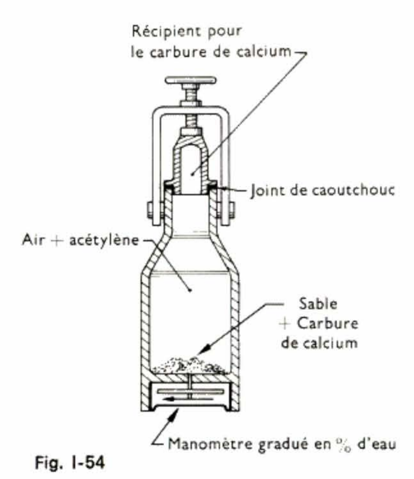


Fig. I-54

sont plongées dans le sable sur la courroie transporteuse) Cependant, leurs indications dépendent, outre de la teneur en eau, de la régularité de la répartition du sable sur la bande ainsi que de la masse volumique de ce sable. Cette mesure peut aussi se faire par prélèvement, à l'aide d'une bombe dans laquelle on mélange une masse fixe de sable à un volume constant de carbure de calcium finement pulvérisé. L'eau du sable et le carbure de calcium se combinent pour donner de l'acétylène dont la pression permet d'apprécier la teneur en eau du sable et cela avec une précision suffisante (fig. I-54).

4.3. Sables ou mélanges spéciaux pour le moulage ou le noyautage. — Les différentes compositions de sables ou de mélanges spéciaux peuvent être employées indifféremment pour la confection des moules ou pour celles des noyaux. La consistance du moule ou du noyau résulte de l'action agglomérante d'un produit mélangé au sable et qui est particulier à chaque technique.

4.3.1. Les sables plastiques à consistance ordinaire

1° *Le sable au silicate de soude.* — On mélange à du sable siliceux, de granulométrie adaptée à la fabrication désirée, 3 à 4 % de silicate de soude de module supérieur à 2 (le module d'un silicate est le rapport des masses de silice et de soude anhydres qu'il contient: $\frac{SiO_2}{Na_2O}$). Le moule, ou le noyau, est serré par secousses et pression ou par soufflage. Il est durci ensuite, soit instantanément par injection de gaz carbonique; soit naturellement, en 24 à 36 heures, par l'action du gaz carbonique de l'air. Le mécanisme de la réaction est schématisé par l'équation chimique suivante:

$$Na_2O, n\,SiO_2, + n\,H_2O + CO_2 \rightarrow CO_3Na_2 + n\,SiO_2, H_2O$$

La silice formée précipite sous forme d'un gel colloïdal qui agglomère les grains de silice du sable.

Les moules et les noyaux peuvent être utilisés immédiatement. Néanmoins les noyaux qui seront très enveloppés de métal doivent être étuvés afin de supprimer le dégagement de vapeur d'eau qui, à la coulée, pourrait engendrer des soufflures.

2° *Le sable au silicate de soude et au silicium pulvérisé* (procédé Nishiyama). — La prise résulte de l'oxydation du silicium qui rompt l'équilibre de la réaction d'hydrolyse:

$$Na_2O\ n\,SiO_2, + H_2O \rightarrow 2\,Na\,(OH) + n\,SiO_2, H_2O$$

On emploie 4 à 8 % de silicate de module 2 et 1 à 4 % de ferro-silicium FeSi à 80 % finement pulvérisé. Le temps de prise varie entre une et quatre heures.

3° *Le sable au silicate de soude et au ciment Portland.* — Le mélange est fait en trois temps:

— mélange de sable siliceux (*G*.50 à 70) à 1 % de brai ou d'argile kaolinite, malaxage durant une minute;

— addition de 4,5 à 5,5 % de silicate de soude de module 2, degré Baumé 50, malaxage pendant deux minutes;

— addition de 1,5 à 2 % de ciment Portland, malaxage: une minute au maximum. Le sable doit être utilisé dans le quart d'heure qui suit sa préparation. Le temps de prise est compris entre une et quatre heures.

Remarque : tous les sables au silicate présentent l'avantage de ne pas dégager de fumées ni de gaz à la coulée.

4° *Le sable à l'huile de lin et au bioxyde de manganèse.* — Ce sable, sans corps à vert, est laissé dans la boîte après serrage pendant que le bioxyde de manganèse oxyde l'huile qui agglomère les grains de silice. La durée de la prise peut être réglée en modifiant le rapport des masses d'huile et de bioxyde de manganèse.

5° *Les sables aux résines synthétiques avec catalyseur.* — Ce dernier permet d'obtenir la prise à froid. On emploie:

— résine urée-formol + catalyseur: la durée de la prise est difficile à régler;

— résine alkyle + catalyseur au perborate: la prise peut être réglée mais dépasse une heure;

— urée-furfurol + acide phosphorique: la durée de prise peut être réduite à dix minutes environ;

— phénol-furfurol + catalyseur: la durée de prise est réglable à partir de dix minutes environ;

— résines isocure-1 + isocure-2, catalysées par la triéthylamine. Ce procédé récent donne une prise instantanée mais il exige quelques précautions car le brouillard de gaz carbonique et de triéthylamine, dont l'injection provoque la prise, est toxique. Il faut aspirer l'excès du mélange gaz-triéthylamine à la sortie de la boîte (ou du moule) et travailler dans un local bien aéré.

6° *Le sable au ciment Portland* (procédé Randupson) (Durand et Pons). — Il consiste à mélanger au sable 8 à 12 % de ciment Portland et de l'eau; la prise demande plusieurs heures. Ce procédé est utilisé pour le moulage et le noyautage de pièces de grandes dimensions coulées en acier ou en fonte grise. L'addition de 1 à 1,5 % de mélasse permet de retoucher éventuellement ces moules ou noyaux. Le débourrage est difficile.

4.3.2. Les sables à consistance fluide (bouillies)

— *Premier exemple : silicate de soude, acide sulfurique et chaux (procédé Lias).* — Dans ce procédé, d'origine soviétique on prépare un mélange de sable avec 4 à 6 % de silicate de soude (de module 2,5 à 2,8), 0,1 à 0,5 % de produits mouillants (savons alcalins), 4 à 7 % de silicate de chaux, de l'acide sulfurique et 1,5 à 2 % d'eau. La réaction provoque un dégagement gazeux important, puis le mélange devient assez fluide pour être versé sur le modèle dans le châssis (ou dans la boîte à noyaux). Le remplissage peut être amélioré par vibrations. La prise a lieu après plusieurs minutes (20 à 40 mn). Les bulles de gaz emprisonnées confèrent au sable une grande perméabilité. Les moules peuvent être coulés sans étuvage; néanmoins, s'ils sont enduits d'une couche à l'eau, il faut préalablement les sécher, soit à l'étuve (250 à 300 °C), soit superficiellement à la torche, immédiatement avant la coulée.

— *Second exemple : silicate d'éthyle, alcool, eau, acide chlorhydrique et base (procédé Shaw).* — Le silicate

d'éthyle est hydrolysé par l'addition d'un mélange d'alcool et d'eau en présence d'acide chlorhydrique qui sert de catalyseur. Au moment de l'utilisation, on ajoute le sable (en général de la sillimanite, à grains anguleux et à granulométrie très étalée, ou de la mullite ou encore du zircon) puis on neutralise l'acide chlorhydrique à l'aide d'un sel d'ammonium. Un précipité très fin de silice colloïdale se forme et agglomère les grains de sable. Le mélange passe par une phase gélatineuse, dite *phase caoutchouc*, pendant laquelle il est facile de démouler le modèle qui peut être sans dépouille ou même localement avec un peu de contre-dépouille. Le moule durci est flambé ; l'alcool formé par la décomposition du silicate brûle en provoquant des gerces qui assurent une excellente perméabilité. La précision des pièces obtenues peut atteindre quelques centièmes de millimètre.

4.4. Machines à mouler. — La fabrication des pièces de fonderie en grandes séries doit son très grand développement surtout à l'essor de l'automobile (les méthodes de production ont servi de modèle aux autres industries). Le moulage à la machine s'est progressivement substitué au moulage à la main qui n'est pratiquement plus utilisé que pour la fabrication de pièces particulières. Le moulage à la machine met en œuvre des plaques modèles adaptées aux dimensions et aux possibilités de la machine.

4.4.1. Classement des machines à mouler

1° *Les machines à mouler en châssis.* — Le moule et le châssis décrivent le circuit : moulage — coulée — décochage. Après avoir été libéré le châssis revient ensuite à la machine.

2° *Les machines à mouler en mottes.* — Le moulage sur la machine utilise un châssis ouvrant ou fixe pour la confection du moule. La motte est extraite de ce châssis et décrit seule le circuit moulage — coulée — décochage de sorte que la manutention de retour du châssis à la machine est supprimée.

4.4.2. Classement des machines à mouler en fonction du mode de serrage

1° *Les machines à mouler par pression.* — Elles sont utilisées indifféremment pour le moulage en châssis ou en mottes, les machines étant distinctes et adaptées à chaque cas. La force totale développée dépend des dimensions de la plaque modèle. Ces machines sont :

— Soit *à piston* (fig. I-55) : machines hydrauliques, pneumatiques ou mixtes (oléo-pneumatiques). Dans ce dernier cas, afin de modérer la détente brusque de l'air comprimé, un liquide (de l'huile en général) est interposé entre le cylindre de la machine et l'air comprimé.

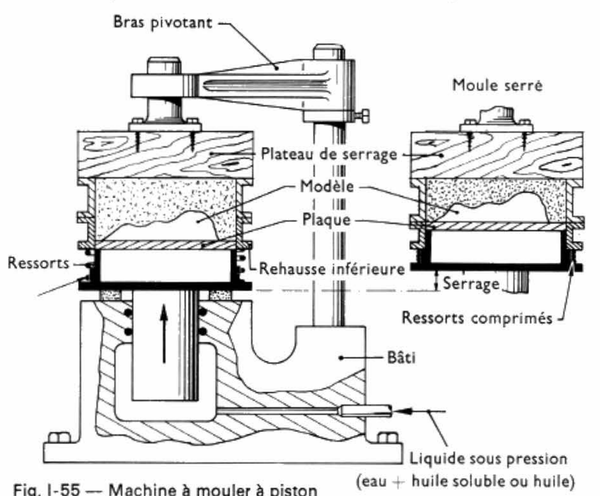


Fig. I-55 — Machine à mouler à piston

— Soit *à membrane* et pneumatiques (fig. I-56) ; le serrage est alors assuré par une membrane en caoutchouc interposée entre la tête de la machine et le sable du moule : l'air comprimé déforme la membrane qui répartit la pression sur le sable du moule.

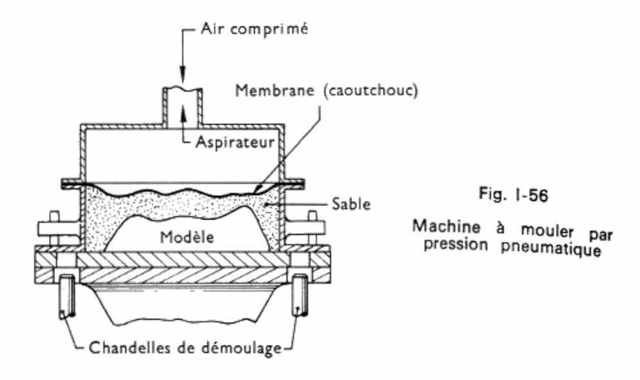


Fig. I-56

Machine à mouler par pression pneumatique

Les châssis utilisés sur ces machines doivent être rigides et très robustes : ils doivent résister à la pression exercée sur le sable sans se déformer. Ces machines exécutent le serrage du sable puis le démoulage de la plaque modèle ; dans les machines récentes, le cycle est automatique et leur production peut atteindre trois cents parties de moule à l'heure.

2° *Les machines à mouler par secousses et pression.* Dans ces machines, le serrage du sable est réalisé dans un premier temps par inertie : l'ensemble plaque modèle, châssis et sable est soulevé par la table de la machine puis retombe par gravité sur le bâti. Trois à cinq secousses suffisent généralement pour assurer le serrage autour du modèle. La partie supérieure du moule est ensuite serrée par pression contre le plateau fixé sur la tête de la machine. Le châssis repose directement sur la plaque modèle et la machine est une machine à piston.

3° *Les machines à pression et à vibrations combinées.* Dans ces machines, pendant que le plateau fixé sur la tête de la machine est maintenu sur le sable du moule par la pression de la table, une masselotte actionnée par l'air comprimé vient taper verticalement de bas en haut sous la table. Le serrage du sable est ainsi très sensiblement amélioré.

4° *Les machines à projection de sable.* — La tête de ces machines comporte une turbine qui projette le

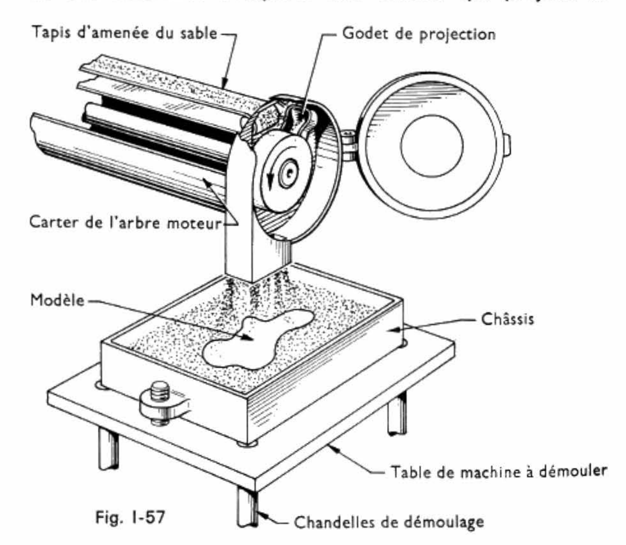


Fig. I-57

sable, par inertie centrifuge, dans le châssis contenant le modèle ou la plaque modèle. La tête est supportée par deux bras articulés, de sorte que les dimensions des châssis serrés peuvent varier dans de larges proportions (fig. I-57).

4.4.3. Machines à mouler spéciales automatiques

1° *Les machines à mouler en mottes avec coulée verticale.* — Les mottes portent de chaque côté une partie de l'empreinte des pièces et elles sont poussées les unes contre les autres. Ainsi le moulage est exécuté en continu ;

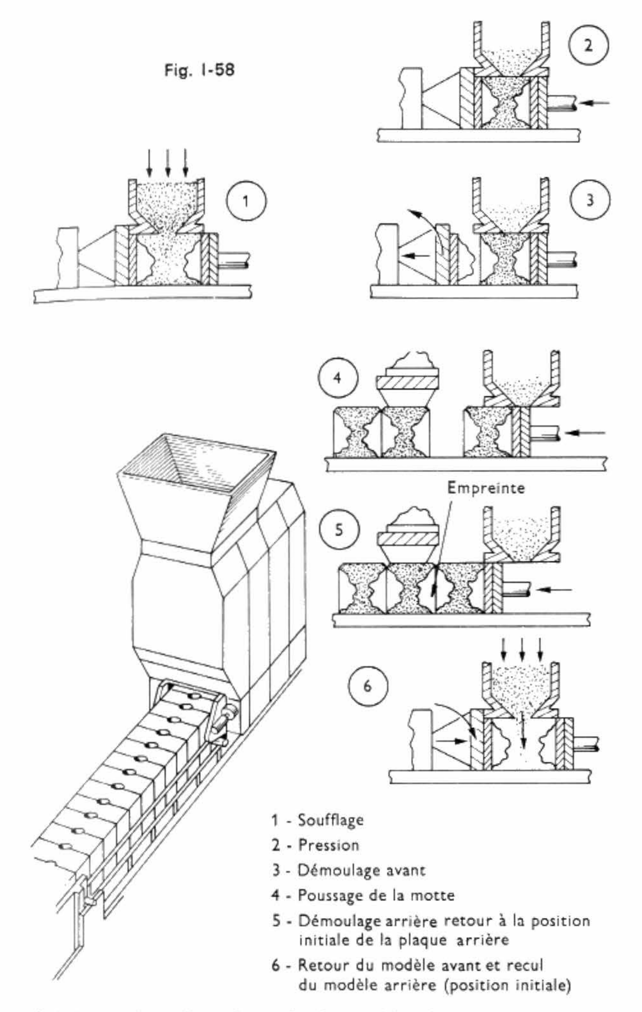


Fig. I-58

il doit en être de même de la coulée. Les moules coulés passent dans une sorte de trommel qui sépare le sable et les pièces (fig. I-58).

2° *Les machines à mouler en mottes horizontales.* — Les mottes sont serrées dans des châssis faisant partie de la machine, puis sont évacuées vers la coulée après fermeture automatique ; la coulée est identique à celle des moules en châssis conventionnel (fig. I-59).

3° *Les machines à préparer les carapaces (Shell-molding).* — Dans ces machines, la plaque modèle métallique est chauffée à 270-280 °C. La machine projette le sable préenrobé de résine soit par gravité, soit par soufflage sur la plaque. La résine se polymérise sur une profondeur de 5 à 10 mm, agglomérant les grains de sable. Le démoulage est réalisé par la machine et le cycle recommence (fig. I-60 et I-61).

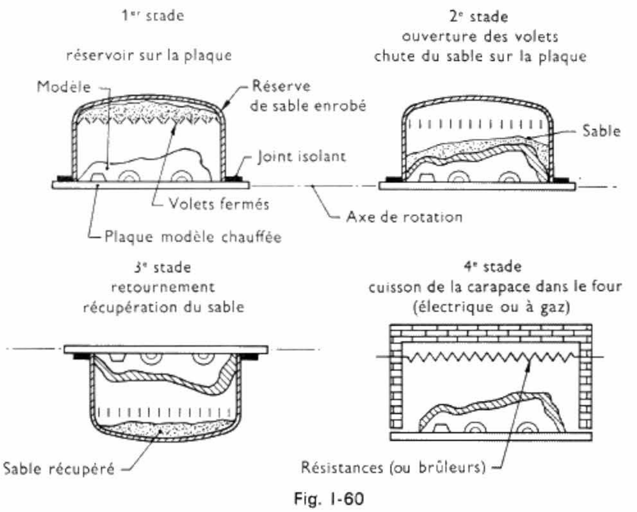


Fig. I-60

4° *Les machines spéciales utilisant le sable au silicate de soude.* — Dans ces machines le sable est d'abord soufflé sur la plaque modèle (ou dans la boîte à noyaux) puis il y a injection de gaz carbonique. Le sable durcit par carbonatation de la soude du silicate et la silice colloïdale formée permet l'agglomération des grains de sable (fig. I-62, page suivante). Ces machines sont très utilisées pour la fabrication des noyaux.

4.4.4. Machines à fabriquer les noyaux

1° *Les boudineuses.* — Elles sont utilisées pour la fabrication de noyaux cylindriques en continu. Les embouts sont amovibles et de diamètres différents.

2° *Les machines à souffler.* — Dans ces machines, le sable à noyaux est contenu dans un réservoir dont le fond

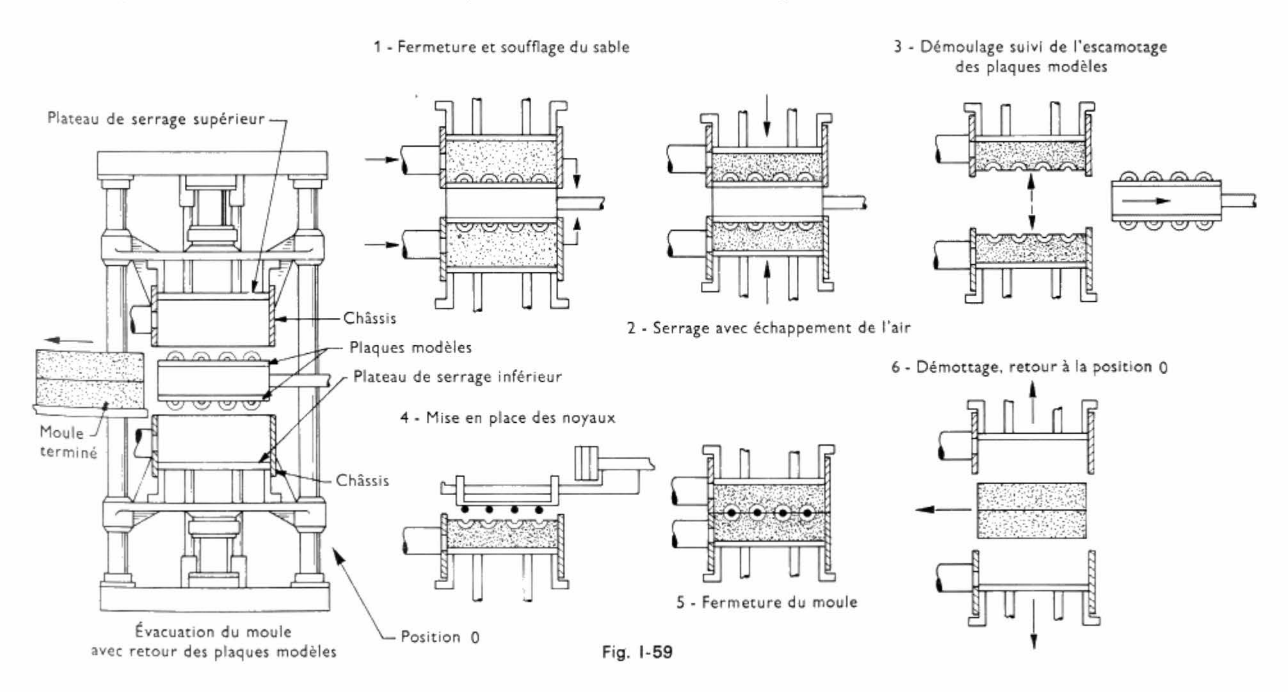


Fig. I-59

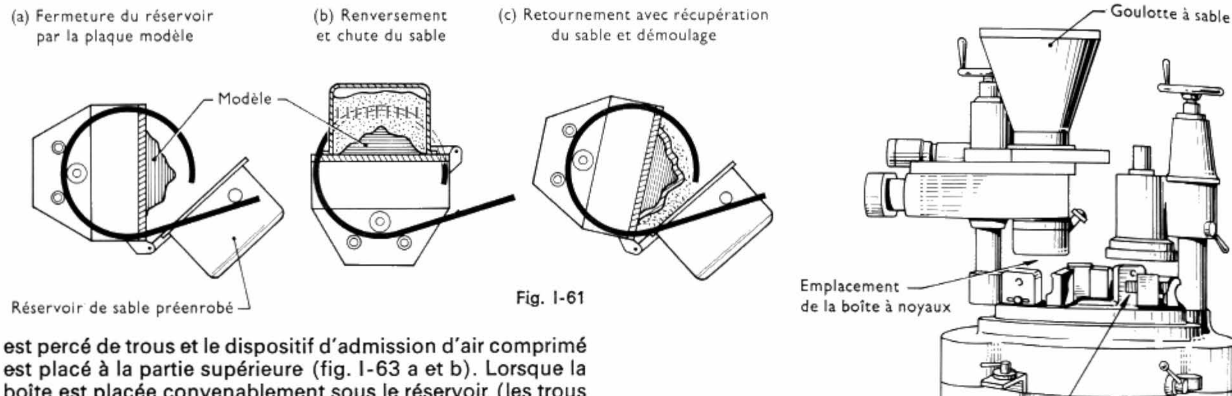


Fig. I-61

Fig. I-62

est percé de trous et le dispositif d'admission d'air comprimé est placé à la partie supérieure (fig. I-63 a et b). Lorsque la boîte est placée convenablement sous le réservoir (les trous du réservoir vis à vis de ceux de la boîte) on admet l'air comprimé dans le réservoir en manœuvrant une manette. Un piston, placé sous la table supportant la boîte, plaque celle-ci contre le réservoir, pendant que le sable est entraîné par l'air et passe du réservoir dans la boîte à noyaux. Des filtres, placés judicieusement, permettent à l'air de s'échapper tandis que le sable reste dans la boîte à noyaux. Le démoulage peut être manuel ou mécanique.

4.5. Moulage ou noyautage à l'aide de mélanges spéciaux

4.5.1. Moulage au plâtre. — Le sable siliceux, le zircon, la mullite ou la sillimanite, peuvent être intimement mélangés au plâtre à sec dans la proportion de 50 % ou plus ; l'eau est ensuite ajoutée en quantité suffisante pour obtenir, après malaxage, une bouillie assez liquide pour être versée dans le moule. Le remplissage est amélioré et la formation de bulles d'air supprimée par vibrations. Quelquefois, dans le but d'augmenter la résistance mécanique du moule, on ajoute des fibres d'amiante à cette bouillie. Avant la coulée de l'alliage, le moule est séché dans une étuve chauffée entre 110 et 130 °C afin de faire évaporer l'eau en excédent. Ensuite, le moule est placé dans un four, dont la température est proche de 900 °C ; ce traitement permet d'éliminer une partie de l'eau combinée du plâtre et cela sur une épaisseur qui dépend de la grosseur du moulage.

Ce procédé permet de reproduire des détails très fins. Cependant, il est long et coûteux. Il est surtout utilisé pour la fabrication de plaques modèles en alliage d'aluminium car la peau est très fine et elle ne nécessite que peu de grattage et de retouche.

4.5.2. Procédé mixte. — Ce procédé comporte d'abord une prise partielle à froid, puis un durcissement complet à l'étuve. À un sable, généralement de noyautage, on mélange du silicate de soude et de la bakélite. En insufflant du gaz carbonique à froid, on obtient une prise du silicate de soude ; elle confère une résistance suffisante pour permettre les manutentions du noyau sans faire appel à des coquilles. Ensuite le noyau est placé dans une étuve où se produit la polymérisation de la bakélite.

4.5.3. Moulage à l'aide de sables durcissant à chaud au contact de la plaque modèle ou de la boîte à noyaux chauffée. — Le sable est mélangé à des résines thermodurcissables. On distingue le sable sec fluide (procédé *Cröning*) et les sables humides (procédé dit *en boîte chaude*). Dans le procédé Cröning, l'agglomérant utilisé est à base de bakélite et le mélange est sec et fluide : le sable éloigné des parois chauffées n'est pas aggloméré et il est récupéré par simple retournement de l'outillage pour être réemployé. Dans le procédé en boîte chaude, la résine est utilisée avec un solvant afin qu'elle se répartisse mieux sur les grains du sable mais, après utilisation, le sable qui n'est pas aggloméré ne peut être récupéré.

1° *Procédé « Cröning »*

— *Préparation du sable :* Initialement, la résine finement pulvérisée était intimement mélangée au sable dans la proportion de 5 à 8 %. Mais, après quelques manœuvres de retournement de l'outillage et de la cuve, le sable, plus dense, avait tendance à se séparer de la résine, de sorte que, pour conserver un mélange adéquat, il fallait que la teneur en résine soit grande et que les malaxages soient fréquents.

Actuellement, le sable est préenrobé, c'est-à-dire que chaque grain de sable porte, collé à lui-même, la quantité de résine nécessaire à son agglomération.

Il existe deux méthodes d'enrobage utilisées industriellement :

- *À froid :* la résine en solution dans un solvant (alcool le plus souvent) est mélangée au sable dans la proportion de 2,5 à 3,5 % environ, selon les applications envisagées. Le solvant est ensuite évaporé et récupéré en partie. La masse, formée de sable et de résine agglomérés, est pulvérisée pour retrouver la fluidité initiale.
- *À chaud :* la résine pulvérulente est fondue dans un courant d'air chaud et projetée sur un rideau de sable qui tombe en chute libre. Il doit également subir une pulvérisation afin que les parties grumeleuses soient supprimées.

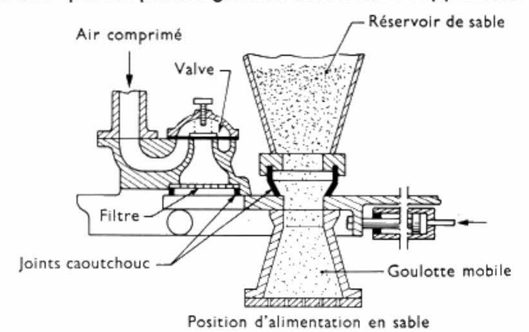


Fig. I-63 a — Position d'alimentation en sable

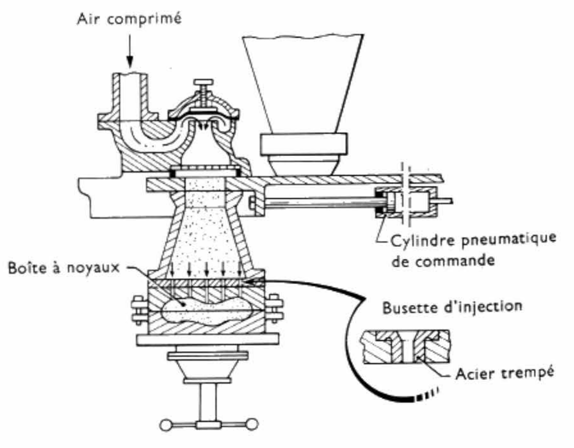


Fig. I-63 b — Position de soufflage

— *Fabrication des masques (ou carapaces) et des noyaux creux :* le mélange froid et fluide de sable et de résine ou le sable préenrobé est projeté sur la plaque modèle (ou dans la boîte à noyaux) préalablement portée à 270-290 °C. Elle est enduite d'un agent de démoulage qui évite le collage de la résine (contenant généralement du silicone). Cette projection est réalisée soit par gravité, soit à l'aide d'air comprimé pour améliorer la compacité de la carapace (ou du noyau).

Afin d'éviter les fausses serres ou la formation de talus par glissement oblique du sable, le récipient contenant le sable est obturé pendant le retournement jusqu'au moment où il atteint la position horizontale au-dessus de la plaque modèle ou de la boîte : ses volets d'obturation (genre persiennes) s'ouvrent alors et le sable tombe verticalement sur l'outillage (V. fig. I-60). Dans une machine récente, un mouvement de rotation rapide imprimé au récipient maintient le sable collé au fond par inertie centrifuge (V. fig. I-61) ; celui-ci tombe verticalement lorsque le mouvement est stoppé (fig. I-64).

Goulotte de sable
Cuisson
Chauffage
Soufflage

Fig. I-64

Machine à fabriquer des carapaces

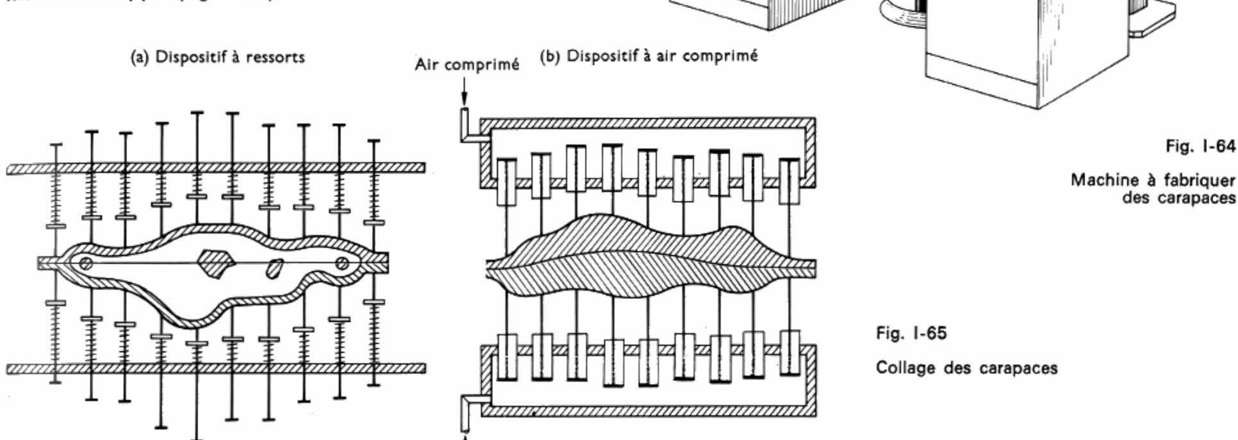


Fig. I-65

Collage des carapaces

La carapace (ou le noyau) est démoulée à l'aide de poussoirs répartis sur la surface du joint, manœuvrés mécaniquement ou pneumatiquement. La carapace, quelquefois le noyau lorsqu'il est de forte dimension, est placée sur une fausse plaque de façon à lui redonner la forme désirée car le démoulage à chaud provoque la plupart du temps une déformation sensible. Après refroidissement, les carapaces (ou les noyaux) sont stockées jusqu'au moment de leur utilisation.

Dans certaines installations, les deux parties de carapace sont confectionnées simultanément et on profite de la température élevée pour les coller ensemble en disposant sur le joint, une colle fluide à base de résine thermodurcissable. Les deux parties sont maintenues serrées l'une contre l'autre par un dispositif à chandelles dont la pression est assurée soit par ressorts, soit par l'air comprimé (fig. I-65).

2° *Procédé dit « en boîte chaude ».* — Ce procédé peut être utilisé pour la fabrication de moules en mottes mais la principale application est la confection des noyaux. Le sable est mélangé à une solution de résine et d'un solvant (généralement alcool ou eau), qui facilite la répartition et lui confère un certain *corps à vert*. La teneur en résine est ajustée avec précision, compte tenu des conditions d'utilisation du noyau.

Parmi les nombreux agglomérants disponibles, les plus couramment utilisés sont les suivants :

— les sucres avec un accélérateur acide ;
— l'urée-formol avec un accélérateur acide ;
— le phénol-formol (résol ou novolaque) avec de l'hexaméthylène-tétramine ;
— l'urée-formol modifiée par l'alcool furfurylique ;
— le phénol-formol modifié par l'alcool furfurylique ;
— les résines furaniques avec un accélérateur acide ;
— la mélamine-formol.

Le remplissage de la boîte à noyaux (ou du châssis) est généralement obtenu par soufflage. Les plaques modèles ou les boîtes à noyaux sont portées à une température comprise entre 130 et 290 °C, selon la qualité de la résine utilisée. La prise exige le maintien du mélange de sable contre la paroi chaude pendant une vingtaine de secondes environ. Pendant ce temps, la plaque modèle ou la boîte à noyaux doit céder au sable la quantité de chaleur nécessaire pour polymériser l'agglomérant ; aussi, leur épaisseur doit-elle être étudiée soigneusement afin que les outillages aient une masse suffisante pour emmagasiner la quantité de chaleur indispensable à la réussite du procédé.

La motte en sable (ou le noyau) est démoulée et éventuellement ébavurée pendant le refroidissement. Elle peut être utilisée immédiatement pour la coulée, ou stockée pour être coulée ultérieurement. Dans les machines récentes, le cycle de fabrication de la motte ou du noyau est rendu automatique après mise au point du temps nécessaire à la prise, de sorte que la qualité de la fabrication est très régulière.

3° *Avantages et inconvénients du procédé « Cröning » et du procédé dit « en boîte chaude » :*

— *Avantages :* les châssis de moulage sont supprimés ainsi que les manutentions qu'ils nécessitent ; de même, pour les noyaux, les coquilles de séchage sont inutiles et les manutentions inhérentes à l'étuvage des noyaux courants sont évitées. Ces procédés permettent d'obtenir des pièces de formes et de dimensions plus précises qu'avec les autres procédés de moulage et de noyautage. Ils donnent une grande souplesse de fabrication car il est possible de couler différentes nuances d'alliage en préparant moules et noyaux indépendamment de l'élaboration de l'alliage à couler.

— *Inconvénients :* le chauffage des plaques modèles et des boîtes à noyaux implique l'utilisation d'outillage métallique coûteux. De ce fait, ces procédés ne sont utilisés que lorsque la série des pièces à fabriquer est suffisamment importante pour supporter l'amortissement des frais d'outillage sans grever exagérément le prix des moulages.

4.5.4. Moulage en pisé réfractaire semi-permanent (Procédé *Busselmann*). — Cette technique consiste à confectionner un moule en pisé réfractaire. Le modèle doit être conçu pour que lui-même et la pièce puissent être démoulés sans avoir à détériorer le moule proprement dit : toutes les parties doivent être bien dépouillées. Lorsque la forme de la pièce comporte des parties sans dépouille, ou en légère contre-dépouille, elles sont obtenues par noyau.

Après confection du moule, les parties en contact avec le métal sont recouvertes d'une couche de quelques millimètres d'épaisseur constituée par un coulis contenant 10 % environ de coke pulvérisé (cette couche sert d'isolant au moment du démoulage et protège le moule). Après chaque démoulage une nouvelle couche de coulis est appliquée ; il est possible de couler une trentaine de pièces avant que le moule ne soit détérioré.

Ce procédé est utilisé pour la fabrication de pièces de dimensions importantes, qui n'exigent pas une grande précision dimensionnelle (ancres de marine, corps morts, contrepoids, bittes ou cabestans) et dont le nombre à fabriquer est peu élevé.

4.6. Moulage en moule métallique permanent par gravité. — Ce moulage est aussi appelé *coulée en coquille par gravité*.

4.6.1. Cas général. — La pièce est obtenue en coulant l'alliage par gravité dans un moule de fonte ou d'acier pour les alliages ferreux, cuivreux, d'aluminium ou de zinc et, quelquefois, dans un moule en aluminium pour les alliages d'aluminium. Le moule métallique est constitué de deux ou plusieurs parties qui donnent en creux la forme extérieure de la pièce à obtenir. Les parties évidées de la pièce sont obtenues :

— *par des noyaux métalliques*, lorsque leur forme est simple et leurs dimensions suffisantes pour permettre le démoulage des parties démontables éventuelles ;

— *par des noyaux en sable aggloméré*, lorsque la partie évidée est trop compliquée ou de trop faibles dimensions pour permettre la confection de noyaux métalliques démontables. Dans ce cas, le moule est mixte ; aux États-Unis d'Amérique il est appelé moule semi-permanent.

Généralement, l'alliage est coulé en source et en dépression dans le moule (fig. I-66) ; il peut être aussi coulé en

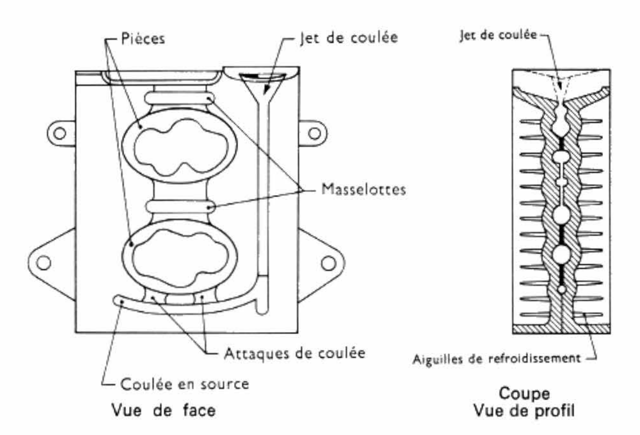


Fig. I-66 — Coquille ou moule permanent pour la coulée de la fonte grise

chute indirecte avec basculement de la coquille en fin de remplissage, afin de profiter de la gravité pour l'alimentation de la pièce en cours de solidification.

La surface de la coquille, en contact avec l'alliage, est recouverte d'enduit protecteur (*poteyage*). C'est un enduit mauvais conducteur de la chaleur (mélange de silicate de soude, de blanc d'Espagne et d'eau) dans les parties contre lesquelles l'alliage doit être conservé liquide le plus longtemps possible (coulées, masselottes, évents, etc.). Un enduit bon conducteur de la chaleur (mélange de graphite colloïdal et d'eau) est appliqué dans les zones où la solidification doit être rapide (solidification dirigée).

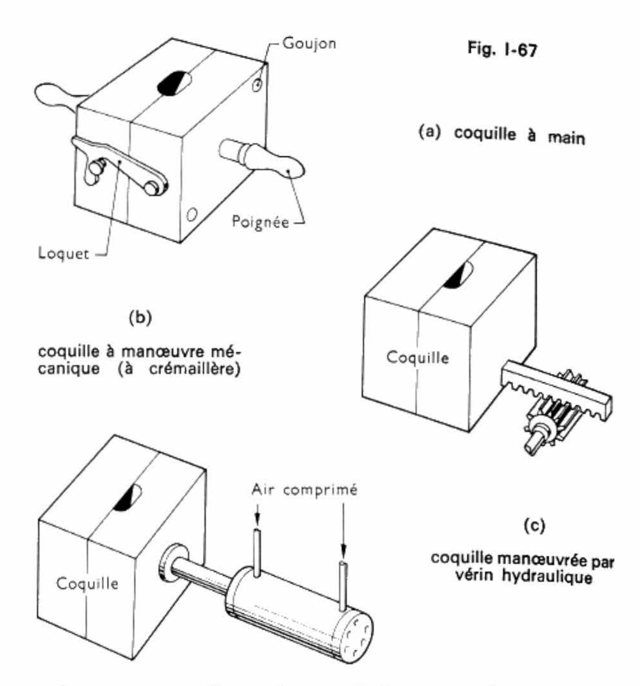


Fig. I-67

La manœuvre d'ouverture et de fermeture des coquilles, ainsi que l'éjection des pièces obtenues, peuvent être manuelles, mécaniques, pneumatiques ou hydrauliques (fig. I-67).

La coulée peut également être exécutée sur un carrousel circulaire à plusieurs postes (6 à 12) ; dans ce cas, les différentes opérations d'ouverture et de fermeture des coquilles, de dépôt de noir de fumée et d'éjection de la pièce sont automatiques, la main-d'œuvre n'intervenant que pour la mise en place éventuelle de noyaux en sable et pour la coulée de l'alliage (fig. I-68).

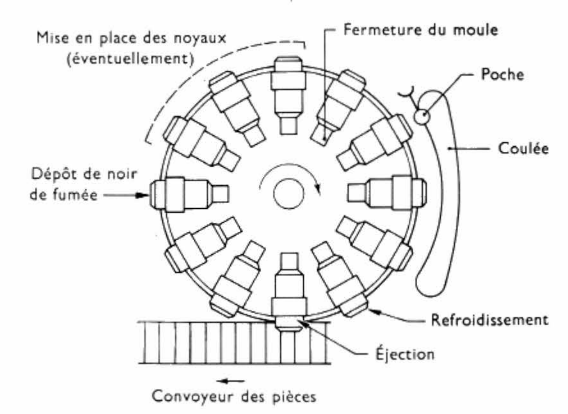


Fig. I-68 — Carrousel automatique pour la coulée en coquille de la fonte

Les alliages les plus couramment coulés en coquille sont :

— les alliages blancs (à base d'étain, de plomb, d'antimoine, de bismuth, de zinc) ;

— les alliages de zinc (appelés aussi zamack : zinc — cuivre et zinc — aluminium) ;

— les alliages d'aluminium ;

— les alliages de magnésium ;

— les alliages cuivreux (bronzes, laitons, cupro-aluminium et cupro-nickel) ;

— certains aciers ;

— la fonte (de composition généralement hypereutectique).

Cette technique, qui se développe encore, donne d'excellents résultats pour des pièces d'une masse inférieure à 20 kg ; en U.R.S.S., des pièces de plus d'une tonne sont coulées en coquilles.

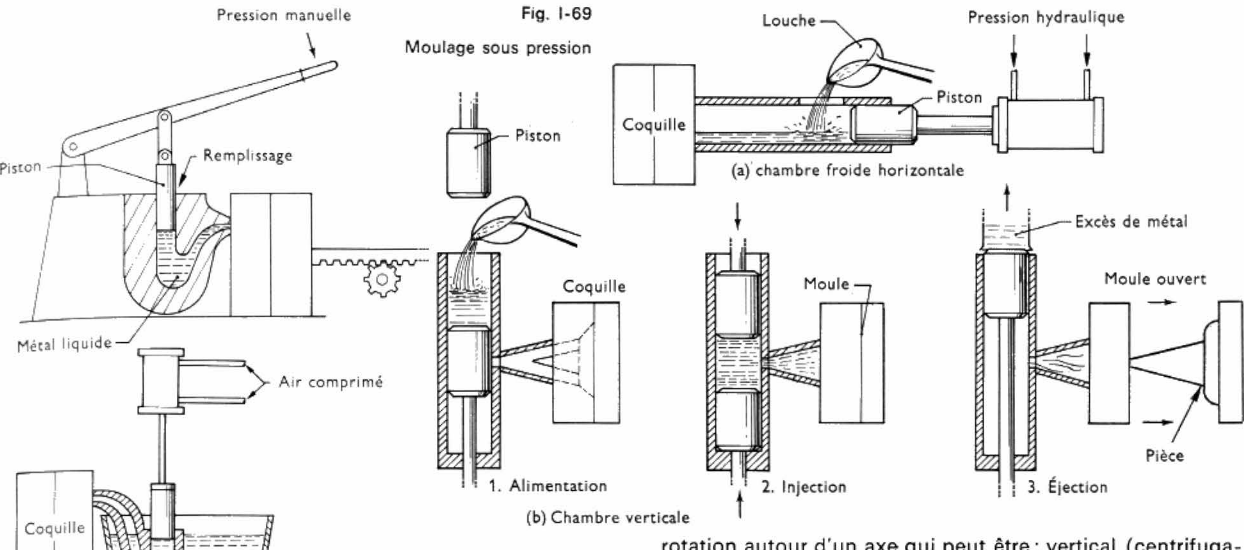


Fig. I-69
Moulage sous pression

Utilisation d'un vérin pneumatique ou hydraulique

4.6.2. Moulage en coquille au renversé. — Ce procédé artisanal s'applique à la coulée de deux types d'alliages blancs : les alliages à base de zinc (zinc - aluminium ou zinc-aluminium-cuivre), les plus utilisés actuellement, et les alliages à base de plomb (plomb-antimoine).

Le moule est généralement constitué de deux parties repérées par goujons. L'alliage liquide est coulé dans le moule retourné, légèrement préchauffé, ; on le remplit complètement. Après une attente dont la durée dépend surtout des dimensions du moule, une couche d'alliage est solidifiée contre les parois et le moule est renversé. La partie encore liquide de l'alliage est récupérée et le moulage obtenu est creux sans avoir nécessité de noyau. Après refroidissement et ébavurage soigné, la pièce est ensuite recouverte d'un dépôt électrolytique de cuivre ou simplement de peinture imitant le bronze.

4.7. Moulage sous pression. — Dans cette technique, au lieu d'alimenter le moule par gravité, l'alliage liquide (ou pâteux) est introduit sous pression dans l'empreinte. Cette pression peut être exercée de différentes manières : par l'effet de l'inertie centrifuge, par l'intermédiaire d'un gaz (ex. : air) comprimé agissant sur la surface de l'alliage liquide ou à l'aide d'un piston (manœuvré manuellement, mécaniquement, pneumatiquement ou hydrauliquement) qui chasse l'alliage d'un cylindre et le fait pénétrer dans le moule (fig. I-69).

4.7.1. Moulage sous pression centrifuge ou centrifugation. — Le moule est animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe qui peut être : vertical (centrifugation verticale), horizontal (centrifugation horizontale) ou incliné (centrifugation inclinée ou oblique).

Cette technique s'applique à la coulée dans des moules en sable, dans des moules métalliques permanents et quelquefois dans des moules en graphite.

Les moules en sable peuvent être confectionnés en sable vert et maintenu dans un châssis, comme un moule ordinaire mais avec un degré de serrage plus élevé, ou en sable aggloméré en motte.

Le graphite, provenant de chutes d'électrodes de fours à arc, est utilisé pour la confection de formes simples dans la coulée de bronzes ou de laitons.

Les moules métalliques permanents sont en fonte ou en acier. Les aciers spéciaux traités permettent de couler trois fois plus de pièces que la fonte car ils peuvent être refroidis par circulation d'eau. Ils sont utilisés pour les moules servant à la centrifugation des tubes et des tuyaux en fonte grise (ou à graphite sphéroïdal).

1° *Moules en sable.* — Si l'axe de rotation est vertical, la coulée sous pression centrifuge s'applique indifféremment à la fabrication de pièces de révolution dont l'axe est confondu avec celui de rotation (roues de wagon, poulies car il est possible de réduire ou de supprimer le masselottage ; fig. I-70), ou de pièces de forme quelconque réparties autour de l'axe de rotation. Dans ce cas, les moules sont superposés pour former des grappes de pièces (fig. I-71).

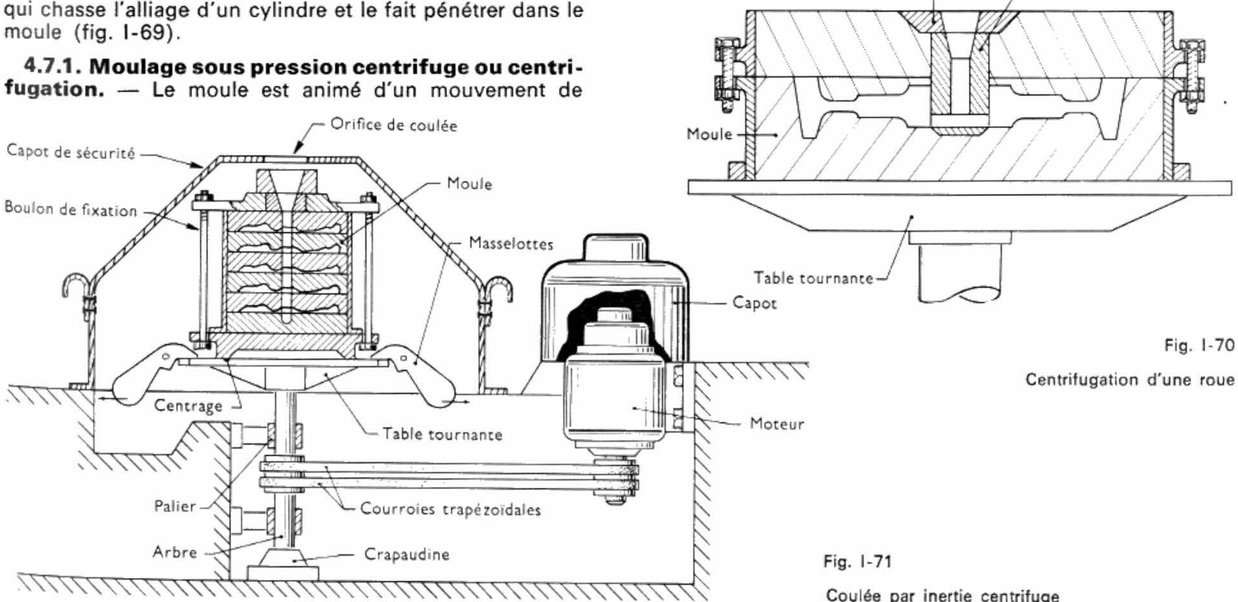


Fig. I-70
Centrifugation d'une roue

Fig. I-71
Coulée par inertie centrifuge

Lorsque l'axe de rotation est horizontal, cette technique s'applique exclusivement à des pièces de révolution telles que des chemises de cylindres de moteur à explosion. La coulée de l'alliage est faite latéralement par un canal horizontal parallèle à la génératrice du cylindre. L'inertie centrifuge plaque l'alliage suivant une épaisseur régulière contre la paroi du moule qui tourne à grande vitesse jusqu'à complète solidification. La pièce est creuse, sans noyau (fig. I-72).

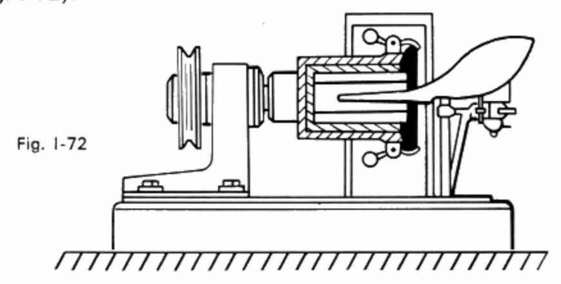


Fig. I-72

2° *Moules métalliques permanents.* — L'application la plus importante de coulée sous pression centrifuge est la fabrication de tuyaux en fonte, mise au point en 1917 par Sansaud de Lavaud (fig. I-73).

La coquille, qui a six mètres de longueur pour les diamètres les plus courants, tourne sur elle-même. La fonte est amenée à une extrémité de la coquille par un chenal de coulée, assez étroit pour pénétrer dans le moule. Elle est

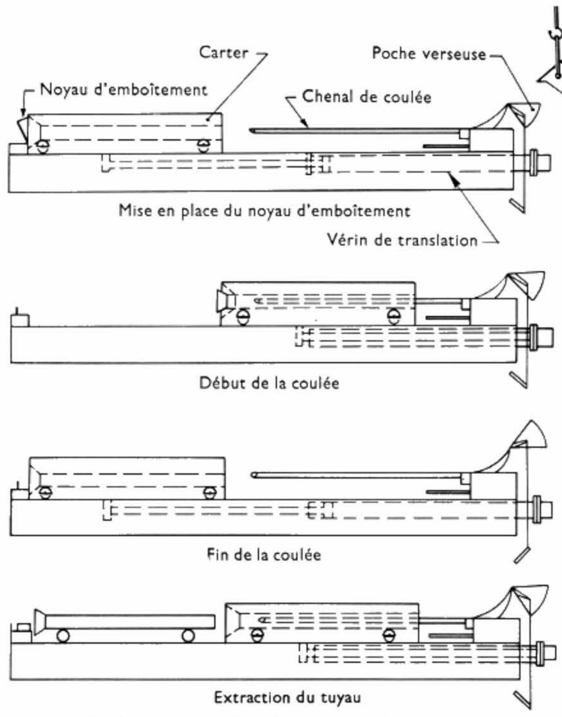


Fig. I-73 — Centrifugation horizontale des tuyaux

distribuée sous forme d'un jet étroit et régulier pendant que la coquille tourne et de déplace longitudinalement à une vitesse uniforme. Ainsi le jet de fonte liquide forme une hélice qui se ressoude à elle-même et se solidifie rapidement. Le tuyau terminé se présente comme un ruban de fonte enroulé en hélice dont les bords sont soudés entre eux. À l'extrémité qui doit servir pour l'emboîtement, un noyau permet d'obtenir la forme particulière. À l'autre extrémité de fin de coulée, un couvercle dit *coupe-fonte* laisse évacuer l'excédent de métal éventuel. Avant la coulée, la coquille est saupoudrée intérieurement de poudre de ferro-silicium afin de réduire la trempe de la fonte au contact de la coquille. Après extraction, le tuyau, encore rouge, passe à travers un four de recuit en roulant sur des rails parfaitement alignés et légèrement inclinés. Pendant le trajet, d'une durée d'environ une heure pour les grands diamètres, le tuyau reprend la forme rectiligne et, à la sortie, il est plongé dans un bain de goudron. Il est ainsi enduit intérieurement et extérieurement.

La distribution de la fonte liquide doit être très régulière, c'est pourquoi la poche verseuse a la forme d'un segment de cylindre et est animée d'un mouvement de rotation synchronisé avec le déplacement de la coquille.

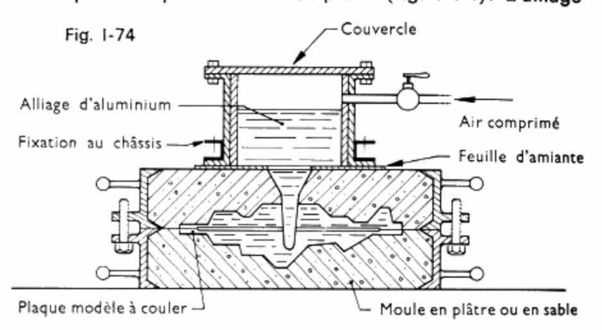
4.7.2. Moulage sous pression d'un gaz (ou d'air) comprimé. — La pression d'un gaz (ou d'air) comprimé est appliquée sur la surface d'un bain métallique et force l'alliage à pénétrer dans l'empreinte du moule (en plâtre, en sable, ou métallique). La pression est maintenue jusqu'à complète solidification de la pièce dans le moule.

1° *Moule en plâtre (ou en sable).* — Le moule est préparé selon la technique décrite précédemment. Le procédé est surtout utilisé pour la coulée des plaques modèles en alliage d'aluminium.

La descente de coulée est recouverte d'une feuille d'amiante sur laquelle on place un récipient métallique sans fond, généralement cylindrique, et garni intérieurement d'un revêtement réfractaire parfaitement séché. Ce récipient, porté à une température comprise entre 400 et 600 °C, est centré par rapport à l'entonnoir de coulée et fixé solidement sur le châssis du moule. Sa capacité doit être suffisante pour contenir la quantité d'alliage nécessaire à la coulée de la plaque modèle.

Le couvercle, amovible, est relié par un tuyau souple, à la source de gaz ou d'air comprimé. Des boulons de fixation latéraux permettent d'assurer l'étanchéité du couvercle sur la partie supérieure du récipient (fig. I-74). L'alliage

Fig. I-74



d'aluminium liquide est versé dans le récipient à une température qui est comprise entre 680 et 750 °C suivant la nuance. Le couvercle est fixé solidement au corps et la vanne du gaz (ou de l'air) comprimé est ouverte : sous l'effet de la brusque augmentation de pression (de 5 à 10 bars), la feuille d'amiante se déchire et l'alliage pénètre dans l'empreinte du moule ; la pression est maintenue pendant toute la durée de la solidification. Après décochage et refroidissement complet, la plaque modèle est ébarbée, grattée et retouchée suivant le processus indiqué précédemment. Quelquefois, un vide partiel est établi dans l'empreinte afin d'améliorer le remplissage.

2° *Moule métallique permanent (ou coquille).* — Une chambre de pression borgne, terminée par un col de cygne (Gooseneck), se remplit partiellement d'alliage liquide en basculant dans le creuset de maintien. En fin de basculement, le bec vient se placer contre l'orifice d'un moule métallique. Le gaz (ou l'air) comprimé admis brusquement par la partie supérieure du récipient chasse l'alliage liquide de la chambre et l'injecte dans le moule (fig. I-75). La pression couramment utilisée est comprise entre 20 et 50 bars.

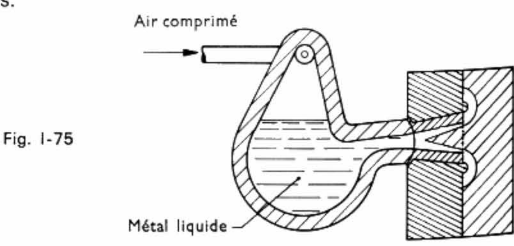


Fig. I-75

Fig. I-76
Machine à chambre de pression chaude

Dans certaines installations récentes, les empreintes des moules sont reliées à des réservoirs dans lesquels on maintient un vide partiel de sorte que la coulée par refoulement sous pression s'allie à la coulée sous vide et par aspiration. Ce procédé mixte a permis d'obtenir des pièces de très faible épaisseur (quelques dixièmes de millimètre) pour lesquelles les propriétés mécaniques de certains alliages sont remarquables et, jusque-là, insoupçonnées.

4.8. Machines utilisées pour le moulage sous pression. — La température de fusion de l'alliage et celle nécessitée pour l'injection sont les deux principaux critères qui guident le choix de la machine à couler sous pression.

Lorsque la température de fusion de l'alliage est inférieure à 500 °C (alliages de zinc, de plomb, d'étain et, à la limite de température, d'aluminium), le four de maintien (ou de fusion) fait partie de la machine et le dispositif de coulée sous pression (à pression de gaz ou par piston) est maintenu en permanence dans l'alliage liquide. Ce sont les machines *à chambre de pression chaude*, plus communément appelées machines *à chambre chaude* (fig. I-76).

Dans le cas où la température de fusion et de maintien de l'alliage est trop élevée pour permettre de laisser en permanence le dispositif d'injection dans le bain sans risquer de voir ses propriétés mécaniques s'altérer rapidement, le four de fusion ou de maintien est séparé complètement de la machine et l'alliage liquide ou pâteux est introduit dans la chambre de pression manuellement, mécaniquement, par pression ou par dépression (fig. I-77), la pression d'injection étant donnée par l'action d'un piston. Ce sont les machines *à chambre de pression froide* ou machines *à chambre froide.*

4.8.1. Machines à chambre chaude. — Différents dispositifs sont utilisés. Ils diffèrent suivant que la pression d'injection est obtenue par pression de gaz ou par piston vertical. La chambre de pression est immergée et s'alimente directement dans le bain d'alliage après chaque injection ; le niveau du bain doit donc constamment être maintenu au-dessus d'un niveau minimal afin d'assurer l'alimentation de la chambre (V. fig. I-76).

Fig. I-77

a) Alimentation mécanique — b) Alimentation par pompe à piston — c) Alimentation par pression — c) Alimentation par dépression

4.7.3. Moulage sous pression obtenue par piston. L'alliage, contenu dans la chambre de pression, est injecté sous forte pression sous la poussée d'un piston plongeur commandé, soit manuellement à l'aide d'un dispositif à leviers (V. fig. I-69), soit mécaniquement à l'aide d'un vérin pneumatique ou hydraulique. La pression appliquée dépend notamment du dispositif utilisé et de l'alliage à mouler ; elle est comprise entre 5 et 200 bars.

4.8.2. Machines à chambre froide. — L'alliage liquide ou pâteux (alliages cuivreux) est introduit dans le cylindre d'injection manuellement (à l'aide d'une louche), mécaniquement, par pression de gaz, à l'aide d'un piston ou d'une pompe centrifuge ou par dépression (V. fig. I-77).

Un piston, manœuvré à la main ou mécaniquement, oblige l'alliage à pénétrer dans l'empreinte. L'ensemble cylindre et piston d'injection peut être soit vertical (fig. I-78), soit

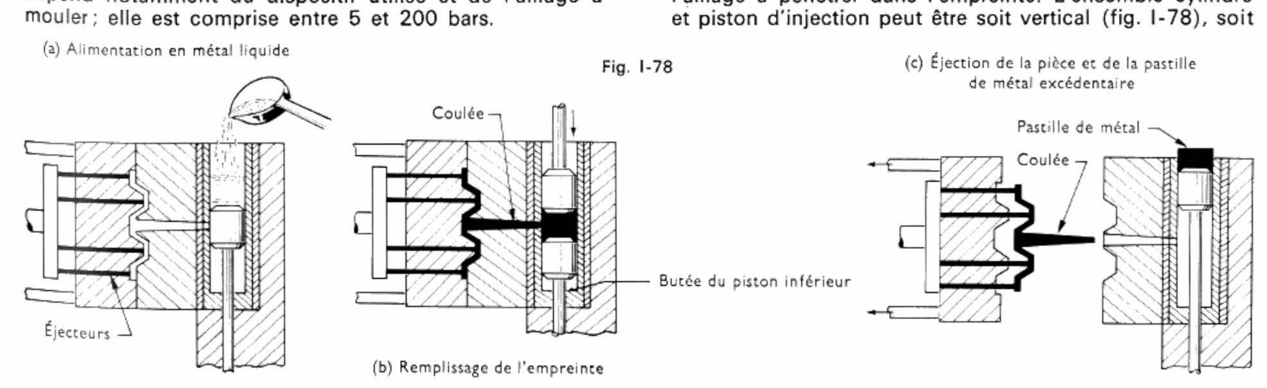


Fig. I-78

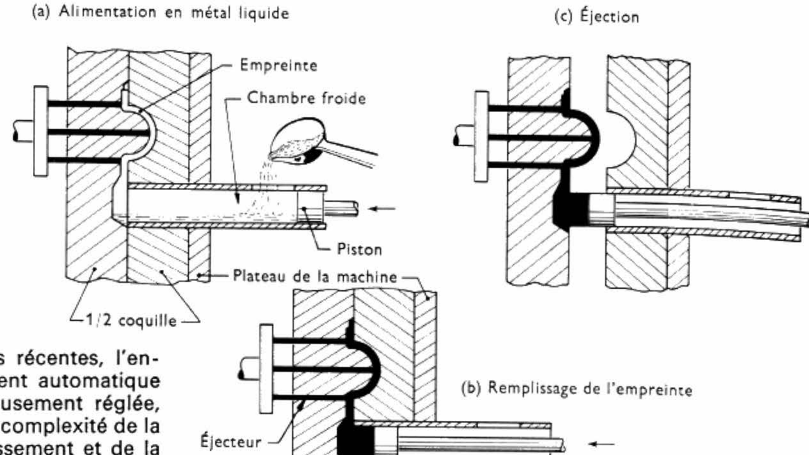


Fig. I-79

Machine à chambre froide horizontale alimentée manuellement

horizontal (fig. I-79). Dans les machines récentes, l'ensemble de ces opérations est complètement automatique et la durée de chaque cycle est minutieusement réglée, compte tenu des qualités de l'alliage, de la complexité de la pièce à obtenir, de son temps de refroidissement et de la manœuvrabilité de la machine. Un dispositif de sécurité empêche l'ouverture du moule pendant l'injection. Le rôle du personnel se borne au contrôle des pièces obtenues et à la surveillance du niveau du bain dans le four de maintien (V. fig. I-77 c).

4.8.3. Moules métalliques ou coquilles

1° *Généralités.* — Le moule est conçu pour chaque pièce, en fonction de l'alliage choisi, du type et des dimensions de la machine à couler sous pression.

L'injection dans le moule est effectuée à l'état liquide pour les alliages blancs et pour les alliages d'aluminium et à l'état pâteux pour les alliages cuivreux. Dans le premier cas, le métal se solidifie dans le moule, comme dans la coulée ordinaire, et dans l'étude du moule, il faut tenir compte des propriétés de fonderie de l'alliage, de la dimension des coulées et des sections des attaques. Dans le second cas, la technique est plus compliquée et s'apparente un peu à celle du filage : elle exige des puissances nettement plus grandes que dans le cas précédent par suite du travail important exigé par l'injection de l'alliage pâteux dans l'empreinte du moule. L'érosion du moule est sensiblement plus marquée et les dimensions des attaques et leurs positions doivent être établies avec beaucoup de soin.

Les alliages blancs ont été les premiers utilisés. Les moules en acier au carbone permettent d'effectuer un nombre illimité d'injections avec ces alliages.

La technique s'est étendue ensuite aux zamacks (zinc-aluminium-cuivre), pour lesquels les moules en acier au carbone supportaient 250 000 à 350 000 injections environ. L'utilisation d'un acier allié au chrome-vanadium a permis de doubler cette durée.

Dans la coulée des alliages d'aluminium, les moules en acier au chrome-vanadium ou au chrome-tungstène ou encore au chrome-cobalt-tungstène, supportent un nombre d'injections identique. En revanche, pour les alliages cuivreux, les aciers au chrome-tungstène, traités après usinage, ont une vie qui ne dépasse pas 50 000 injections environ. Des études récentes sur des aciers alliés ont permis d'améliorer encore la durée en service des moules coulés sous pression.

2° *Étude et conception du moule.* — Le moule se compose de deux parties principales : une partie fixe placée sur le côté de la machine qui porte le dispositif d'injection, une partie mobile principale solidaire d'un sommier fixé lui-même sur un plateau manœuvré par un vérin hydraulique très puissant. Les parties mobiles secondaires à démoulage particulier et les noyaux parallèles au joint sont placés sur la partie mobile principale afin de profiter du mouvement d'ouverture pour effectuer les démoulages spéciaux.

L'étude du moule comprend essentiellement la détermination précise de la surface du joint, qui doit être la plus simple possible, et le choix des parties qui seront mobiles. Les noyaux importants font corps avec la partie mobile principale, car la partie fixe doit permettre un démoulage facile de la portion de la pièce intéressée afin que la pièce complète soit entraînée par la partie mobile au moment de l'ouverture du moule, et éjectée ensuite en fin d'ouverture sous la poussée des éjecteurs.

Le dispositif de coulée doit être minutieusement établi. Il dépend de la nuance de l'alliage à couler, de la forme et de l'importance de la pièce, de la disposition des noyaux et aussi de la machine utilisée. Les noyaux parallèles au joint sont démoulés par rampe, par pignon et crémaillère ou par vérins hydrauliques à double effet

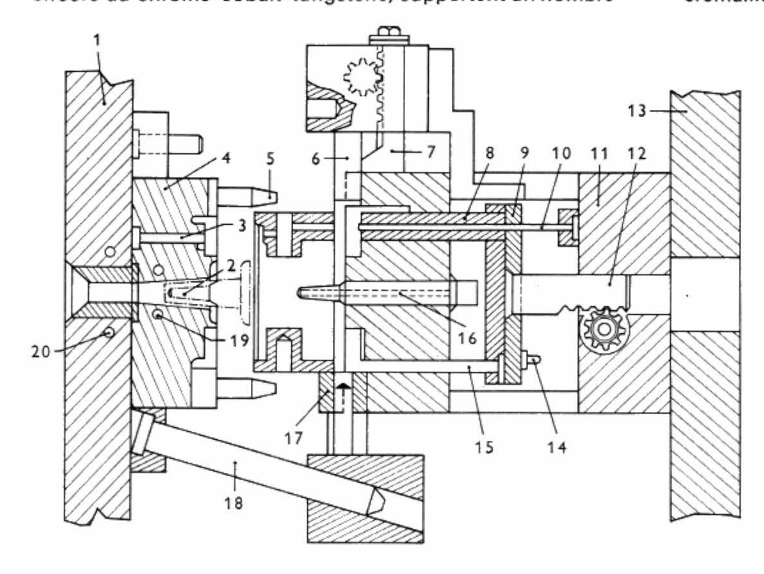


Fig. I-80

1. Plateau fixe de la machine
2. Jet de coulée
3. Noyau perpendiculaire au joint
4. Plaque fixe du moule
5. Goujon
6. Noyau au joint
7. Démoulage par crémaillère
8. Éjecteur tubulaire
9. Plateau éjecteur
10. Noyau perpendiculaire
11. Sommier
12. Crémaillère
13. Plateau mobile
14. Butée de recul
15. Éjecteur simple
16. Pointe à refroidissement par eau
17. Fourrure
18. Goujon oblique de démoulage
19. Circulation d'eau
20. Circulation d'eau du plateau fixe

commandés automatiquement. Les goujons de centrage, au nombre de quatre en général (de trois au minimum), sont solidaires de la partie fixe, la partie mobile portant toujours les bagues. Les éjecteurs sont placés sur les parties de la pièce qui présentent des difficultés de démoulage et sur des surfaces planes et non apparentes en service, pour éviter de laisser des marques visibles. Les traînées d'air ont pour but de faciliter l'évacuation de l'air du moule au moment de l'injection de l'alliage ; elles sont réparties sur le pourtour de la pièce et des noyaux et sur le joint de moulage.

Les parties du moule soumises à un échauffement intensif sont refroidies par une circulation d'eau (jet de coulée, cône de coulée, attaques, parties massives de la pièce, noyaux de faibles dimensions). Le moule est percé de trous qui communiquent entre eux dans les parties à refroidir. La circulation de l'eau doit être minutieusement étudiée et réglée ensuite avec précision (fig. I-80).

4.9. Aluminium coulé sous pression. — L'emploi de noyaux sable (indispensables pour la réalisation de formes intérieures complexes comme, par exemple, dans les culasses ou les collecteurs d'admission des moteurs d'automobiles) conduisait à réaliser ces pièces par moulage en sable ou par moulage en coquille par gravité, leur réalisation par coulée en coquille sous haute pression étant exclue du fait de la porosité des noyaux sable, malgré le poteyage de ceux-ci. L'automatisation du moulage en coquille haute pression (cadence élevée de production) ne pouvait donc pas s'appliquer à ces pièces.

Un progrès technique récent, *la coulée à basse pression*, permet de réaliser ce type de pièces en grande série et à cadence élevée (fig. I-81) : Le métal en fusion (1) remonte dans le moule métallique (2) sous l'effet d'une pression d'air appliquée dans le four étanche (4) de la machine automatique mise au point par Renault-Machines-outils. La régulation précise et automatique de cette pression garantit une surpression constante dans le moule quel que soit le niveau du bain dans le four d'où la suppression définitive des opérations de poteyage des noyaux sable.

Par ailleurs, la liaison four-moule, par un tube injecteur chauffé (5) a permis de diminuer la masselotte de 86 % par rapport à la coulée en coquille par gravité pour des culasses.

Enfin, l'automatisation complète (y compris pour la mise en place des noyaux sable et l'évacuation des pièces) autorise la cadence de production de 40 culasses par machine et par heure et à un prix de revient diminué de 20 % tout en assurant une augmentation de la qualité (précision et résistance des pièces augmentées, rebuts diminués).

5. FUSION

Pour leur fusion, les alliages coulés couramment en fonderie nécessitent des appareils adaptés à leur nature. Parfois, pour un même alliage, les exigences des cahiers des charges ou des spécifications techniques accompagnant les commandes, impliquent l'utilisation d'un appareil de fusion spécial, totalement différent de celui mis en œuvre habituellement. Les différents alliages coulés en fonderie sont classés en fonction du métal dont la teneur est supérieure à 50 % (il est quelquefois qualifié « métal de base »). Ils sont groupés en deux catégories : les alliages ferreux, dont le fer constitue l'élément prépondérant, et les alliages non ferreux, qui englobent tous les autres.

Les alliages ferreux comprennent deux qualités bien distinctes qui diffèrent par leur teneur en carbone : les *fontes*, dont la teneur en carbone est supérieure à 2 %, et les *aciers*, dont la teneur en carbone est inférieure à 2 %.

Les autres alliages sont :

— les alliages cuivreux (teneur en cuivre supérieure à 50 %),
— les alliages d'aluminium (teneur en aluminium supérieure à 50 %),
— les alliages de magnésium (teneur en magnésium supérieure à 50 %),
— les alliages de zinc (teneur en zinc supérieure à 50 %),
— les alliages complexes spéciaux pour lesquels la teneur la plus élevée, n'atteint pas 50 % (au bismuth, au cobalt, à l'étain, au nickel, au plomb, etc.).

5.1. Les « fontes ». — Sous le vocable *fontes* on désigne les alliages fer-carbone dont la teneur en carbone est généralement comprise entre 2,3 % et 4 %. Au moment de la solidification, il se forme un eutectique qui, par décomposition au cours du refroidissement, donne un élément insoluble dans l'austénite constitué soit par du carbone pur (graphite), soit par du carbone combiné ou carbure de fer (cémentite), et dont la présence caractérise les fontes (fig. I-81).

Outre le carbone, les fontes industrielles contiennent du silicium, du soufre, du manganèse et du phosphore, provenant soit du minerai, soit du coke qui a servi à leur élaboration. Leurs différentes teneurs sont fréquemment contrôlées par des analyses chimiques ou spectrométriques au cours de leur élaboration.

Les fontes contiennent également de nombreux autres oligo-éléments qui n'étaient pas dosés jusqu'ici mais dont on constatait l'influence, bonne ou mauvaise, sur les propriétés de l'alliage. Les analyses spectrométriques ont permis de doser rapidement qualitativement et quantitativement ces éléments (antimoine, arsenic, bismuth, bore, étain, plomb, tellure, zinc, etc.) et de mieux connaître de

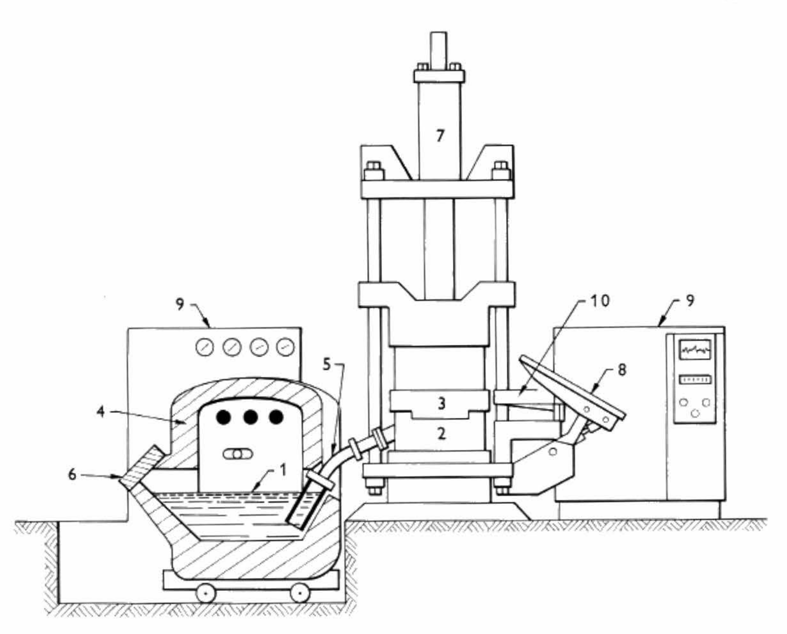


Fig. I-81

Machine automatique à couler basse pression (*Renault-Machines-outils*)

1. Bain d'alliage d'aluminium
2. Moule inférieur
3. Moule supérieur
4. Four réverbère électrique étanche
5. Tube injecteur chauffé
6. Porte de chargement
7. Vérin de fermeture des moules
8. Table automatique d'évacuation des pièces
9. Armoires de commande
10. « Main » de mise en place automatique des noyaux

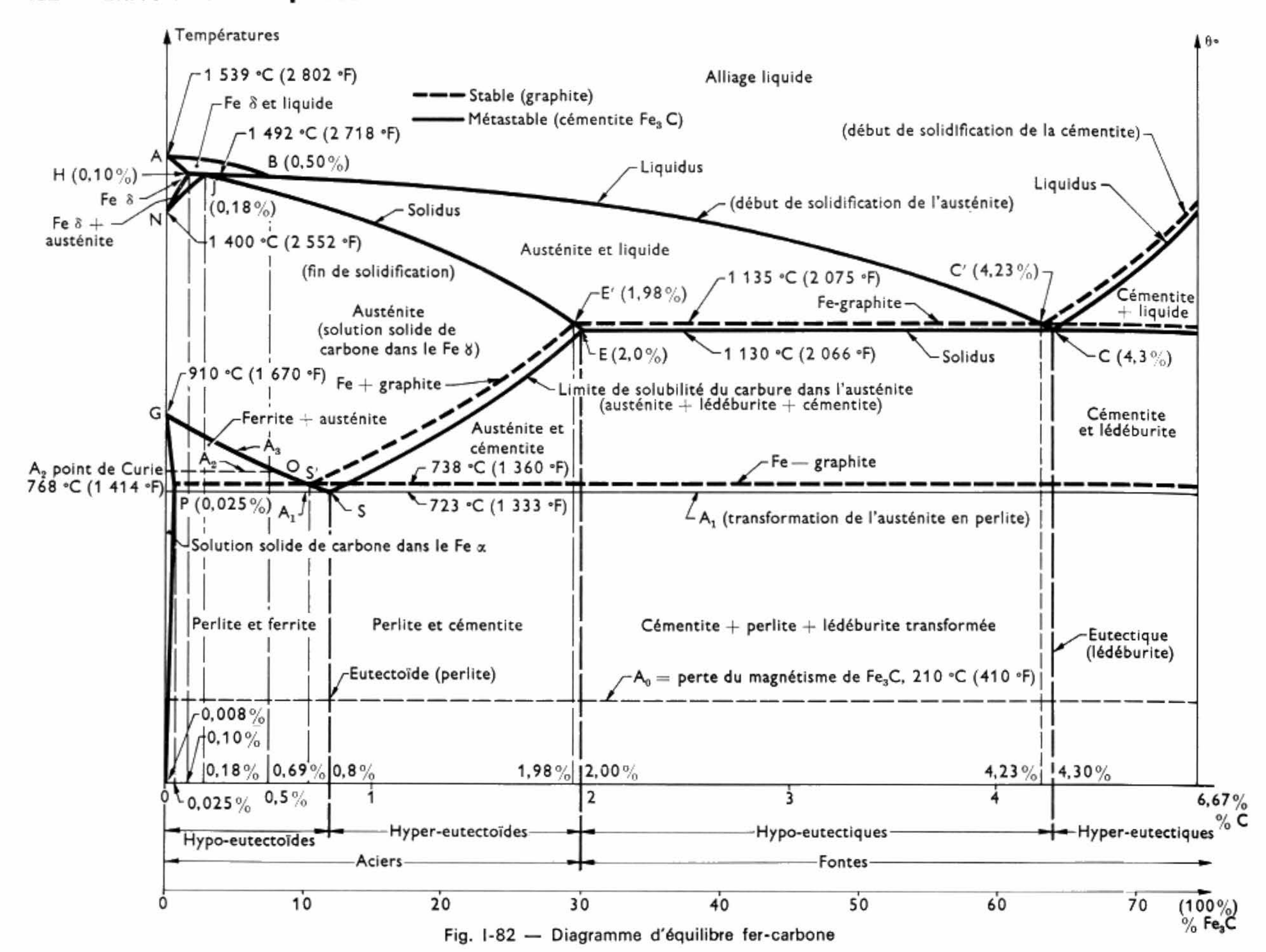


Fig. I-82 — Diagramme d'équilibre fer-carbone

nombreux phénomènes secondaires que la présence de certains de ces éléments peut déclencher pendant la solidification et le refroidissement qui lui fait suite.

Selon les conditions d'élaboration, d'une part, et selon la composition chimique et la vitesse de refroidissement (massiveté du moulage), d'autre part, la fonte peut se solidifier puis se refroidir en suivant, soit le diagramme d'équilibre métastable (fer-carbure de fer ou fer-cémentite) lorsque la vitesse de refroidissement est très rapide, soit le diagramme d'équilibre stable (fer-graphite) lorsque le refroidissement est lent (V. fig. I-82).

Si les fontes suivent le diagramme d'équilibre métastable fer-carbure de fer pendant la solidification et le refroidissement, elles ont une structure comportant de la cémentite libre (ou carbure de fer Fe_3C). Elle se dépose au cours de la solidification et pendant le refroidissement qui lui fait suite, jusqu'au moment de la transformation du fer γ en fer α (point A_{r1} du diagramme métastable).

L'austénite se décompose alors en donnant naissance à du fer α ou ferrite eutectoïde, qui rejette la cémentite eutectoïde (qui était en solution dans l'austénite) sous forme de lamelles: l'agrégat formé prend le nom de *perlite*. La température de transformation, variable suivant les teneurs des différents éléments contenus dans la fonte, est comprise entre 725 et 780 °C. La cassure d'une telle fonte se produit à travers les cristaux de cémentite et les plages de perlite; ces deux constituants sont blancs, aussi, les fontes présentant cette structure, sont-elles appelées *fontes blanches*.

Si les fontes suivent le diagramme d'équilibre fer-graphite pendant la solidification et au cours de leur refroidissement la teneur en carbone est élevée et la vitesse de refroidissement est telle que la réaction de décomposition de la cémentite se produit:

$$Fe_3C \rightarrow 3\,Fe + C$$

(légèrement exothermique dans le sens de la flèche). Au lieu de la cémentite, c'est alors du graphite (carbone amorphe) qui est libéré, jusqu'à la température de transformation du fer γ en fer α. À ce moment, la vitesse de refroidissement naturel est trop rapide pour que la fonte continue à suivre le diagramme d'équilibre stable, et elle subit le même processus de décomposition de l'austénite que la fonte blanche ce qui conduit finalement à l'agrégat de perlite du diagramme métastable. La structure finale de cette fonte est donc constituée par du graphite libre, précipité pendant la solidification et au cours du refroidissement, jusqu'au moment de la transformation du fer γ en fer α à la température de A_{r1} métastable, et par de la cémentite eutectoïde précipitée dans la matrice de ferrite eutectoïde qui forme la perlite. Le graphite a une très faible résistance mécanique, voisine de 2 daN/mm², de sorte que la cassure de la fonte s'amorce par les lamelles de graphite (dont l'effet d'entaille aggrave encore la faible résistance mécanique) et se poursuit à travers les plages de perlite. À l'œil nu cette cassure, dans laquelle la couleur noire des lamelles de graphite domine est d'une teinte grise uniforme. Les fontes dont la cassure présente cet aspect sont appelées *fontes grises*.

Remarque : La différence essentielle entre ces deux nuances de fonte réside dans l'absence de graphite dans la structure des fontes blanches, et dans la présence de graphite dans la structure des fontes grises. Ce sont ces structures fondamentales des deux qualités de fontes (totalement différentes) qui ont reçu les plus nombreuses applications industrielles.

Pour des conditions intermédiaires de vitesse de refroidissement, l'alliage peut suivre le diagramme d'équilibre stable pendant la solidification, puis passer ensuite au diagramme d'équilibre métastable au cours du refroidissement, à l'état solide: dans ce cas, la structure finale est mixte et tient à la fois de la structure des fontes grises par le graphite précipité pendant la solidification et de la structure des fontes blanches par la cémentite déposée au cours du refroidissement par l'austénite. Dans la structure,

on trouve alors du graphite libre, de la cémentite libre et de la perlite. Ces fontes, présentant la structure mixte et comportant simultanément du graphite et de la cémentite libres, sont appelées *fontes truitées*. Elles servent de transition entre les fontes blanches et les fontes grises mais cette nuance accidentelle n'a pas d'application industrielle.

5.1.1. Les fontes blanches

1° *Fontes blanches utilisées à l'état brut de coulée.* — Le tonnage des pièces coulées en fonte blanche représente, en France, environ 15 % du tonnage total des pièces fabriquées en fonte. Les constituants de la fonte blanche ont une dureté élevée: la dureté Brinell de la cémentite est supérieure à 650 hbar et celle de la perlite est comprise entre 200 et 300 hbar. La dureté de l'ensemble suit la loi des mélanges, elle est comprise entre 300 et 500 hbar.

Par suite de leur grande dureté à l'état brut de coulée, les fontes blanches sont inusinables par les moyens classiques. Leur façonnage éventuel n'est possible que par meulage (ou à l'aide d'outils au carbure de tungstène et à condition de réduire en conséquence les conditions de coupe). Dans les faibles sections, la fonte blanche a une faible résistance aux chocs mais celle-ci augmente assez rapidement avec l'épaisseur des moulages par suite du ralentissement du refroidissement dans le moule. Cette grande dureté confère aux fontes blanches une résistance remarquable à l'usure par abrasion et par érosion, de même que par frottement à sec. Leur structure, exempte de graphite, résiste très bien à l'oxydation par les gaz de combustion (gaz carbonique, oxygène, etc.), et à certaines corrosions.

Applications. — Les principales applications des fontes blanches découlent de leur grande dureté:

— corps broyants de cimenterie: boulets, cylpebs, plaques de blindage;
— corps et roues de pompes d'exhaure, de pompes à schlamms;
— corps et palettes de pulvérisateurs à charbon;
— palettes de turbines à grenailler, à sabler, grilles de dessableuses, de tables à grenailler, palettes de malaxeurs à asphalte, etc.

Pour leur bonne résistance à la corrosion, on les emploie pour fabriquer:

— des grilles et des pièces diverses de foyer;
— des pièces diverses pour pompes à produits chimiques, etc.

2° *Les fontes malléables.* — Après avoir subi un traitement thermique approprié, destiné à modifier leur structure, les pièces coulées en fonte blanche peuvent acquérir des propriétés mécaniques qui se rapprochent de celles de l'acier. Les fontes ainsi traitées sont appelées *fontes malléables*. Il existe deux sortes de fontes malléables qui diffèrent fondamentalement par leurs structures finales, celles-ci étant obtenues par des traitements thermiques distincts:

— la fonte malléable à cœur blanc, obtenue par décarburation de la fonte blanche, mise au point par Antoine Ferchault de Réaumur au début du XVIIIe siècle (1722) et appelée aussi fonte Réaumur ou fonte malléable européenne;
— la fonte malléable à cœur noir, résultant de la décomposition des carbures de la fonte blanche en graphite et ferrite. Elle a été découverte fortuitement aux États-Unis d'Amérique par Boyden, au début du XIXe siècle (1826), alors qu'il tentait d'obtenir de la fonte Réaumur. On l'appelle aussi fonte malléable américaine.

a) *Fonte malléable à cœur blanc:* cette nuance de fonte est réservée à la coulée des pièces de dimensions et d'épaisseur limitées. La fonte est élaborée au cubilot ordinaire.

● Composition chimique visée: C: 2,80 à 3,20 %; Si: 0,45 à 0,75 %; S: ⩽ 0,30 %; P: ⩽ 0,15 %; Mn: 1,5 fois la teneur en soufre lorsque l'épaisseur des moulages est régulière et inférieure à 12 mm, ou 1,7 fois la teneur en soufre + 0,10 à 0,25 % si les pièces comportent des épaisseurs très inégales qui excèdent 12 mm.

● Structure: À l'état brut de coulée, la structure des pièces doit être exempte de graphite libre; constituée essentiellement par de la cémentite libre (eutectique et pro-eutectoïde) et par de la perlite (ferrite et cémentite eutectoïdes), elle est parsemée d'inclusions de sulfures de fer ou de manganèse.

● Traitement thermique: Les pièces sont emballées dans des pots de recuit (coulés en général en fonte blanche ou confectionnés en tôles d'acier inoxydable soudées), avec un mélange de minerai de fer comprenant de 25 à 35 % de minerai neuf (Fe_2O_3) et le complément de minerai usé (FeO). Les pièces sont classées suivant leur épaisseur (3 à 6 mm, 6 à 9 mm, 9 à 12 mm), et ces lots sont emballés séparément, dans des pots différents, avec une quantité de minerai croissante avec l'épaisseur.

La décarburation se produit par la surface des pièces en contact avec l'atmosphère oxydante régnant dans le pot, à une température comprise entre 925 et 950 °C, jusqu'à épuisement du minerai neuf ou arrêt du traitement:

$$Fe_3C + CO_2 \rightarrow 2\,CO + 3\,Fe$$

Afin d'obtenir des pièces exemptes d'oxydation et parfaitement décarburées, il faut régler avec précision:

— la vitesse de régénération du gaz carbonique en fonction de celle de diffusion des carbures à l'intérieur des pièces;
— la quantité de mélange de minerai en fonction de l'épaisseur des pièces à décarburer. Sans réglage, une pellicule d'oxyde de forte épaisseur se formerait sur les pièces. En se détachant elle provoquerait un défaut rédhibitoire appelé *écaillage* (*peeling* en Grande-Bretagne et *scaling* aux États-Unis d'Amérique).

Dans les fours récents, les pièces ne sont plus emballées avec le mélange de minerai. L'atmosphère du four est maintenue légèrement oxydante par un générateur d'atmosphère qui régénère le gaz carbonique de manière que le rapport $\frac{CO}{CO_2}$ soit maintenu constant (entre $\frac{6}{1}$ et $\frac{7}{1}$). Dans ce cas, il faut traiter séparément les pièces classées par tranches d'épaisseur.

La structure finale des pièces présente une légère pellicule superficielle d'oxyde de fer FeO, d'une épaisseur variant de 0,05 à 0,10 mm, et intérieurement des cristaux de ferrite parsemés d'inclusions de sulfures de fer et de manganèse.

Lorsque les pièces ont des différences sensibles d'épaisseur, la structure des parties minces correspond à celle indiquée précédemment mais les parties épaisses s'apparentent à la fonte malléable à cœur noir. Les carbures résiduels sont décomposés en ferrite et en graphite; la structure de ces pièces est mixte: cœur blanc dans les parties minces et cœur noir dans les parties épaisses.

● Caractéristiques mécaniques: Les caractéristiques mécaniques minimales des fontes malléables à cœur blanc font l'objet d'une norme (NF A 32-701, V. tableau) qui prévoit deux types:

Désignation du métal	Diamètre de l'éprouvette (en millimètres)	Résistance à la traction en décanewtons par millimètre carré	Limite d'élasticité en décanewtons par millimètre carré	Allongement	Dureté Brinell
MB 40-10	9	40	25	10 %	⩽ 160 sur la paroi
MB 35-7	9	35	22	7 %	⩽ 220 au centre

La fonte malléable à cœur blanc peut être soudée au chalumeau oxyacétylénique ou à l'arc électrique.

b) *Fonte malléable à cœur noir.*

● Composition chimique: Cette composition doit être parfaitement ajustée de façon que les moulages présentent, à l'état brut de coulée, une structure blanche exempte de graphite primaire libre (il provoquerait une diminution brutale des caractéristiques mécaniques de la fonte malléable recuite, surtout de la résistance à la rupture par traction et de l'allongement). Elle peut cependant varier dans de larges limites, suivant les épaisseurs des pièces à fabriquer.

Toutefois, dans les fonderies à coulée continue, il est beaucoup plus simple de ne couler qu'une seule nuance de métal pour les pièces de toutes dimensions et épaisseurs. L'addition de 0,007 à 0,010 % de bismuth dans la fonte liquide permet d'éviter totalement la précipitation de carbone graphitique primaire pendant la solidification. Le tellure peut être également utilisé à raison de 0,001 %, surtout pour les fortes épaisseurs. Le bismuth et le tellure n'ont pratiquement pas d'influence sur la durée du cycle de recuit.

La composition chimique la plus couramment utilisée actuellement est la suivante : C : 2,45 % $\pm$ 0,10 % ; Si : 1,40 % $\pm$ 0,10 % ; S : $\leqslant$ 0,30 % ; P : $\leqslant$ 0,15 % ; Cr : $\leqslant$ 0,09 % ; Mn : 1,7 fois la teneur en soufre + 0,10 à 0,25 %.

Par suite de l'incorporation d'une grande quantité de riblons d'acier dans le lit de fusion et dans l'ignorance de la teneur en chrome de la fonte, on ajoute systématiquement de 0,002 à 0,003 % de bore dans la fonte liquide afin d'éviter l'effet stabilisant du chrome si, éventuellement, sa teneur était supérieure à 0,10 %. De plus, afin de réduire la quantité d'oxygène que la fonte pourrait contenir après son élaboration, on ajoute également de 0,005 à 0,010 % d'aluminium pur dans la fonte liquide. Cet élément présente, en outre, l'avantage de créer des nucléus qui favorisent la précipitation ultérieure du carbone graphitique pendant le recuit ; ainsi la durée du cycle de recuit peut être sensiblement réduite.

Les additions de bore et d'aluminium sont faites systématiquement au moment du prélèvement du métal liquide : le jet provoque un brassage énergique dans la poche, favorise la diffusion de l'élément d'addition et homogénéise l'alliage. Les additions de bismuth et de tellure sont réservées à la fonte destinée à la coulée des pièces de fortes épaisseurs.

Élaboration de la fonte blanche pour la fonte malléable à cœur noir : Les basses teneurs en carbone et en silicium exigées dans la fabrication de la fonte malléable à cœur noir, confèrent à la fonte une médiocre coulabilité, qu'il est indispensable d'améliorer par une surchauffe importante. Pour cette raison, les cubilots ordinaires sont très rarement utilisés seuls pour la coulée directe car ils ne permettent pas d'obtenir simultanément, d'une façon régulière et suivie, des teneurs assez basses en carbone et une température de coulée assez élevée pour garantir la bonne venue des pièces.

On fait appel, plus couramment :

— au four réverbère à charge froide, chauffé au charbon pulvérisé ;

— au four réverbère en duplex, accouplé avec un cubilot ordinaire à coulée continue ;

— au four rotatif chauffé au charbon pulvérisé ou à l'huile, à charge froide ;

— au cubilot avec avant-creuset, aménagé spécialement pour cette nuance de fonte ;

— aux fours électriques :

a) à arc :
— à électrodes horizontales
— à électrodes verticales
} en charge froide ou en duplex avec un cubilot

b) à induction :
— à canal à moyenne et basse fréquence,
— sans canal à basse fréquence
} en charge froide ou en duplex avec un cubilot ou même un autre four électrique de fusion

● Retrait : les fontes blanches ont un retrait qui varie entre 1,5 et 2 %, suivant l'épaisseur du moulage (le retrait le plus important correspond à la plus faible épaisseur). Pendant le recuit, la précipitation du carbone sous forme de graphite en nodules s'accompagne d'une notable augmentation de volume (masse volumique du graphite : 2,2 g/cm^3 environ, du carbure de fer 7,5 g/cm^3 environ) qui compense, en partie, l'effet du retrait, de sorte que les modèles destinés à la fabrication de pièces en fonte malléable à cœur noir doivent être établis en tenant compte d'un retrait variant de 1,5% pour les pièces minces, à 1,2% pour les pièces épaisses.

● Masselottage : la contraction (environ 5 %) qui se produit au moment du passage de l'état liquide à l'état solide de l'alliage nécessite une alimentation des parties épaisses des pièces au fur et à mesure de la solidification : elle est assurée par des masselottes judicieusement placées et dont l'importance doit être proportionnée au volume de la partie de la pièce à *nourrir*.

● Traitement thermique : il a pour but de transformer la structure de la fonte blanche des pièces à l'état brut de coulée en fonte malléable à cœur noir, par la décomposition des carbures de fer libres. La réaction de décomposition :

$$Fe_3C \longrightarrow 3\ Fe + C\ (\text{graphite})$$

est légèrement exothermique ; la structure finale est constituée par une matrice de silico-ferrite (fer α avec du silicium) parsemée de nodules de graphite de recuit, à contours déchiquetés, avec des inclusions de sulfure de manganèse.

La durée du traitement dépend :

— de la quantité de carbures à décomposer ;

— de la teneur en silicium de la fonte ;

— du rapport des teneurs de manganèse et de soufre (le temps le plus court est obtenu pour une teneur en manganèse égale à 1,7 fois la teneur en soufre + 0,10 à 0,20 %) ;

— de la température de recuit (la diffusion est accélérée lorsque la température augmente) ;

— de la teneur en chrome, qui doit être impérativement inférieure à 0,09 %.

Comme les carbures précipitent dans la fonte blanche à des températures bien distinctes, le traitement thermique comprend deux phases :

— *Phase à haute température* (comprise généralement entre 900 et 960 °C). La cémentite eutectique et la partie de cémentite proeutectoïde libre sont décomposées. Les nodules de graphite se forment, semble-t-il, par germination et croissance autour d'un germe.

À la fin de cette première phase, toute la cémentite libre à cette température étant décomposée, la structure est formée d'austénite saturée parsemée de nodules de graphite de recuit, avec des inclusions de sulfure de manganèse.

Les pièces sont ensuite refroidies rapidement (30 à 100 °C/h) de 950 à 750 °C.

— *Phase à basse température*. Pendant cette deuxième phase, le reliquat de cémentite proeutectoïde et la cémentite eutectoïde, précipitée au moment de la transformation du fer γ en fer α, sont décomposés.

La décomposition de la cémentite eutectoïde est plus rapide dans l'intervalle de température compris entre les points A_{r_1} stable et A_{r_1} métastable et on adopte, dans cet intervalle, une vitesse de refroidissement qui varie de 1,5 °C/h environ pour 1 % de silicium à 6 °C/h environ pour 1,8 % de silicium.

Le graphite provenant de cette deuxième décomposition de carbures proeutectoïde et eutectoïde migre vers les nodules formés pendant la première phase et donnent à leur contour un aspect déchiqueté.

Finalement, la structure est formée :

— de graphite de recuit en nodules à contour déchiqueté et de couleur noire ;

— d'une matrice de silico-ferrite de couleur blanche ;

— de nombreux cristaux polygonaux de sulfure de manganèse de couleur gris bleuté.

Une attaque au nital à 4 % d'acide nitrique (4 % HNO_3 + 96 % d'alcool) permet de mettre les joints des grains de silico-ferrite en évidence sans modifier les autres éléments de la structure, ni leur couleur.

Caractéristiques mécaniques : Les caractéristiques mécaniques de la fonte malléable à cœur noir sont déterminées (selon la norme française NF A 32-702) par un essai de traction exécuté sur l'éprouvette normalisée.

La norme prévoit trois types : MN 35-10 pour la qualité courante, MN 32-8 pour les pièces de serrurerie ou les pièces de machine qui s'accommodent de cette nuance et MN 38-18 réservée plus spécialement à la fabrication des pièces pour l'industrie automobile, pour des camions ou des machines qui exigent des caractéristiques mécaniques élevées.

Désignation du métal	Diamètre de l'éprouvette (en millimètres)	Résistance à la traction en décanewtons par millimètre carré	Limite d'élasticité en décanewtons par millimètre carré	Allongement	Dureté Brinell
MN 35-10	15	35,0	23,0	10 %	150 (1)
MN 32-8	15	32,0	21,0	8 %	156 (1)
MN 38-18	15	38,0	25,0	18 %	

(1) Après un léger meulage.

Limite d'élasticité : La valeur de la limite d'élasticité des fontes malléables à cœur noir atteint les deux tiers environ de la résistance à la rupture par traction. Pour certaines applications, il est primordial d'obtenir la limite élastique la plus grande possible (assemblage avec des matériaux fragiles sans déformation élastique : porcelaine, verre, etc., comme dans le cas de capots et d'isolateurs pour l'électricité). Une addition de 1 % environ de cuivre dans la fonte a pour effet de relever de 10 à 15 % la résistance à la traction et de 25 à 30 % la limite d'élasticité. Lorsque le tonnage de pièces à couler est faible cette addition peut être faite dans la fonte liquide au moment du prélèvement. Lorsque l'addition intéresse toutes les pièces à couler elle est réalisée dans la charge elle-même. Il n'y a pas de perte au feu notable sur le cuivre ajouté.

c) *Fonte malléable à cœur noir perlitique.* — Dans de nombreuses applications, principalement pour l'industrie automobile, les camions et les machines diverses, les pièces en fonte malléable à cœur noir servent de support à des roulements à billes, qui sont introduits à la presse dans leurs logements. Avec de la fonte malléable ferritique, par suite de la grande différence de dureté des matériaux en contact, les chocs, vibrations et secousses provoquent un matage de la fonte malléable : le roulement, qui n'est plus maintenu, tourne dans son logement et la pièce est mise très rapidement hors d'usage. La faible dureté de la fonte malléable à cœur noir explique également l'usure rapide de certaines parties de pièces travaillant à sec ou dans des milieux abrasifs, tels que les maillons de chaîne d'élévateur.

Dans le but d'améliorer la tenue en service de ces différentes pièces, la dureté de la partie frottante a été augmentée par deux procédés différents :

— *Durcissement superficiel par trempe au chalumeau ou par induction :* La partie à tremper est chauffée au-dessus du point de transformation et trempée à l'eau ou à l'huile immédiatement après le chauffage. La structure de la partie trempée est martensitique. Le procédé est coûteux et devient très compliqué lorsque les formes à traiter s'éloignent des formes géométriques simples.

— *Modification de l'ensemble de la structure de la pièce :* La pièce est traitée entièrement afin de modifier la structure ferritique initiale et d'obtenir une structure finale constituée par de la perlite ou de la perlite et de la ferrite en proportions variables selon la nuance de fonte perlitique recherchée. Dans tous les cas, la structure comporte des nodules de graphite.

La norme française NF A 32-703 prévoit trois types de fonte malléable perlitique dont le choix dépend des caractéristiques mécaniques recherchées.

Désignation du métal	Diamètre de l'éprouvette en millimètres	Résistance à la traction en décanewtons par millimètre carré	Limite d'élasticité en décanewtons par millimètre carré	Allongement	Dureté Brinell
MP 50-5	15	50,0	33,0	5 %	170 à 230
MP 60-3	15	60,0	40,0	3 %	200 à 245
MP 70-3	15	70,0	50,0	2 %	240 à 285

Traitement thermique : Le traitement thermique à faire subir aux pièces est différent pour chaque nuance et, pour chacune d'elles il diffère légèrement avec la forme et la massivité des pièces à traiter. Deux méthodes de traitement thermique sont utilisées :

— **Premier cas :** Le tonnage des pièces à traiter dans la même nuance et de la même façon est faible et n'atteint pas la capacité totale d'un four.

● *Première méthode :* Les pièces à traiter subissent d'abord le traitement de recuit ferritique. Ensuite, le traitement perlitique comprend trois phases :

Première phase : Mise en solution d'une partie du carbone graphitique dans l'austénite. — Les pièces sont portées à une température supérieure à celle de transformation du fer α en fer γ (généralement comprise entre 850 et 925 °C) et sont maintenues une à deux heures à cette température (le temps le plus long correspond à la température de maintien la plus basse).

Deuxième phase : Trempe. — Les pièces sont trempées :

— à l'air, à l'aide de puissants ventilateurs lorsque la structure finale recherchée est entièrement perlitique. Dans ce cas, le traitement est terminé ;

— à l'huile, lorsque la structure recherchée comporte une proportion précise de perlite et de ferrite (après la trempe, la structure est martensitique ou sorbito-martensitique).

Troisième phase : Traitement de transformation de la martensite en perlite. Les pièces sont portées à une température comprise entre 550 et 720 °C en général et maintenues à cette température pendant une heure ; les températures les plus basses conduisent à des duretés Brinell élevées, les températures les plus hautes conviennent pour les duretés Brinell faibles. Les pièces sont refroidies à l'air hors du four. La perlite subit une transformation morphologique au cours de ce traitement : les lamelles de cémentite enchâssées dans la matrice ferritique se morcellent et prennent une forme d'équilibre sphéroïdale : c'est la perlite globulaire ou sphéroïdale. Le phénomène prend le nom de *coalescence :* la perlite est coalescée ; la dureté diminue légèrement.

● *Deuxième méthode :* On inocule du manganèse dans la fonte liquide destinée à la coulée des pièces en fonte malléable perlitique. Cette addition est proportionnée à la quantité de perlite résiduelle désirée dans les pièces. Les pièces obtenues ainsi sont enfournées avec les pièces coulées en fonte courante et subissent le même cycle de recuit que les pièces ferritiques. La présence d'une teneur élevée en manganèse retarde la décomposition de la cémentite de la perlite, sans gêner le premier palier, et la structure finale est ferritoperlitique, avec des nodules de graphite.

— **Deuxième cas :** Le tonnage des pièces qui doivent subir le même traitement correspond à la capacité d'un four.

● *Première méthode :* Le four doit permettre de maintenir un écart des températures inférieur à 10 °C entre le point le plus chaud et le point le plus froid.

Première phase. — Elle est identique à celle du recuit ferritique : montée à 925-960 °C, maintien à cette température durant 12 à 24 heures (selon la capacité du four) et descente de 925-960 °C à 700 °C à raison de 30 à 100 °C/h.

Deuxième phase. — Décomposition partielle de la cémentite de la perlite : la durée de cette phase est réduite par rapport au traitement ferritique, mais elle est variable avec chaque nuance de fonte malléable perlitique.

● *Deuxième méthode :* Les pièces sont coulées avec une fonte blanche de base dans laquelle on ajoute, au moment du prélèvement, une quantité de manganèse proportionnée à la nuance de fonte malléable perlitique désirée. L'ensemble des pièces en fonte malléable perlitique de toutes nuances subit le même cycle de recuit.

Première phase. — Montée à 925-960 °C, maintien à cette température durant 15 à 30 heures (suivant la précision des températures et la possibilité de réglage du four), refroidissement dans le four jusqu'à 880 °C, puis à l'air.

Deuxième phase. — Montée à 670-690 °C, maintien à cette température durant 12 à 18 heures environ ; refroidissement complet dans le four.

Ce deuxième procédé est plus onéreux que le précédent et il présente l'inconvénient de nécessiter une plus longue occupation du four.

5.1.2. Les fontes grises

1° *Composition chimique.* — L'alliage binaire fer-carbone se solidifie normalement en suivant le diagramme métastable et donne de la cémentite Fe_3C. Ce carbure de fer est métastable, c'est-à-dire qu'il peut se décomposer sous certaines conditions en ferrite et graphite. Pour obtenir du graphite dans les fontes, il faut qu'elles contiennent d'autres éléments qui favorisent la graphitisation. On classe ces éléments en comparant leur influence sur le comportement du carbone en leur présence, au moment de la solidification.

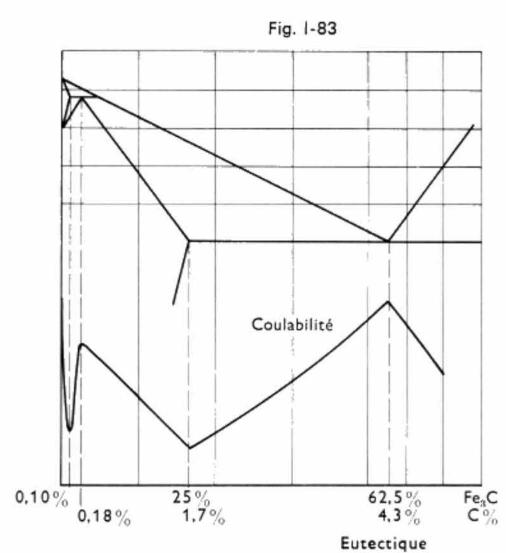
Ceux qui ont tendance à favoriser la précipitation du carbone sous forme de graphite sont appelés *graphitisants*. Les plus courants, classés dans l'ordre décroissant de leur pouvoir graphitisant, sont : le silicium, le phosphore, l'aluminium, le nickel et le cuivre.

Ceux qui ont tendance à maintenir le carbone sous forme combinée (c'est-à-dire sous forme de carbure de fer ou cémentite Fe_3C) sont appelés *antigraphitisants* ou encore *stabilisants des carbures*. Les éléments antigraphitisants les plus courants sont le manganèse, le chrome, le molybdène et le vanadium ; ils forment avec la cémentite Fe_3C un carbure complexe stable.

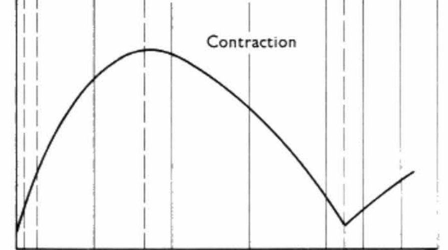
2° *Influence des divers éléments*

— *Carbone :* Les fontes grises courantes ont une teneur totale en carbone C_t généralement comprise entre 2,8 et 3,6 %. Cependant, pour certaines applications spéciales, cette teneur peut atteindre 4 %. Une partie de ce carbone reste combinée au fer pour donner la cémentite de la perlite : c'est le *carbone combiné* C_c (0,7 % environ). Le reste du carbone précipite sous forme de graphite lamellaire libre, de couleur noire, qui donne la teinte grise caractéristique de la cassure de la fonte : c'est le *carbone graphitique* C_g. D'où la relation : $C_t = C_c + C_g$.

Fig. I-83



Variation de la coulabilité dans le diagramme fer-carbone



Variation de la contraction de solidification dans le diagramme fer-carbone

À mêmes teneurs en silicium, manganèse, soufre et phosphore, la teneur en carbone combiné reste comprise entre des limites très voisines, de sorte que la teneur en carbone graphitique suit pratiquement les variations de la teneur totale en carbone.

La résistance à la traction et la dureté Brinell du graphite sont très faibles, aussi les fontes grises à teneur élevée en carbone ont-elles une résistance à la traction et une dureté Brinell plus faibles que les fontes grises à faible teneur en carbone ; pour cette raison elles sont plus facilement usinables.

Le carbone améliore la coulabilité des fontes grises ; elle est optimale à la teneur eutectique (fig. I-83).

Le graphite confère aux fontes grises une grande aptitude à l'amortissement des vibrations, propriété très recherchée dans la construction des machines-outils de grande précision (fig. I-84).

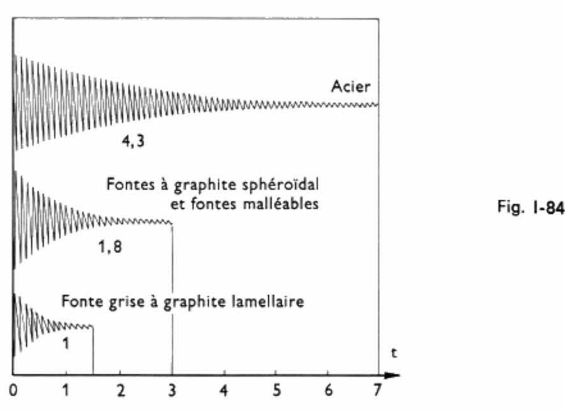


Fig. I-84

Schéma des diagrammes d'amortissement des vibrations de l'acier des fontes à graphite sphéroïdal, des fontes malléables et des fontes grises à graphite lamellaire (ordonnées : amplitude de la vibration : abscisse : temps)

La masse volumique du graphite n'est que de 2,2 g/cm³ alors que celle du carbure Fe_3C est de 7,5 g/cm³ environ. Le graphite occupe donc un volume plus de trois fois supérieur à celui du carbure qui lui donne naissance. Cette augmentation de volume à la graphitisation compense en partie la contraction qui se produit au passage de l'état liquide à l'état solide de la fonte et les modèles doivent être conçus en tenant compte d'un retrait compris entre 0,8 %, pour les pièces épaisses, et 1,3 %, pour les pièces minces (V. fig. I-83).

La précipitation du graphite diminue la masse volumique de la fonte grise : les fontes à forte teneur en carbone ont une masse volumique plus faible que les fontes à faible teneur en carbone (fig. I-85).

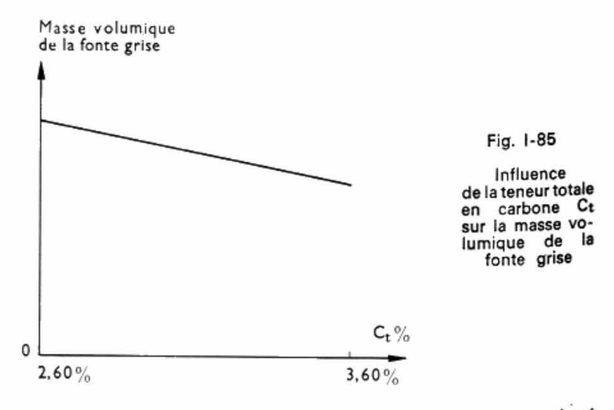


Fig. I-85

Influence de la teneur totale en carbone C_t sur la masse volumique de la fonte grise

— *Silicium :* Le silicium est dissous dans la fonte dont il diminue la dureté Brinell (de 30 points environ pour 1 % de silicium, entre 1 % et 3 % ; fig. I-86), car sa présence, indispensable pour obtenir la précipitation du carbone en graphite, augmente la teneur en carbone graphitique au

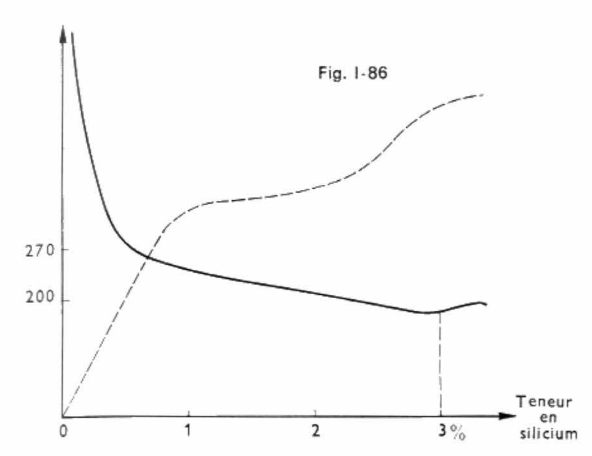


Fig. I-86

Influence de la teneur en silicium sur la dureté de la fonte

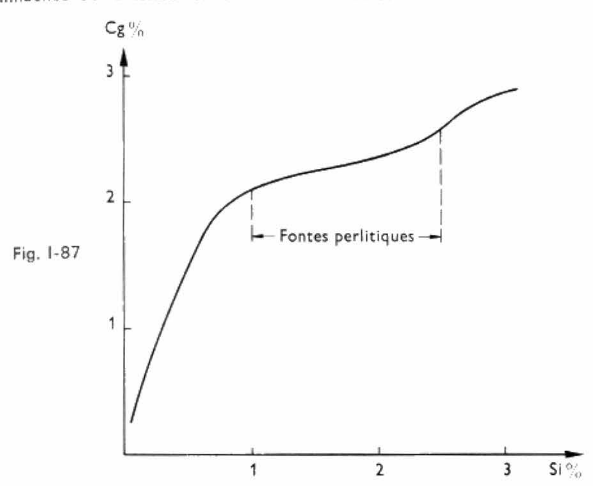


Fig. I-87

Influence de la teneur en silicium sur la formation du carbone graphitique

détriment du carbone combiné (fig. I-87). Il déplace le point eutectique et le point eutectoïde vers la gauche sur le diagramme fer-graphite ; les températures correspondantes s'élèvent.

La teneur en silicium dans les fontes grises varie de 1 % pour les pièces de forte épaisseur à 3 % au maximum pour les pièces très minces, comme les segments de piston (2 mm).

— *Soufre :* Le soufre provient du coke utilisé comme combustible, tant dans le haut fourneau que dans le cubilot. C'est un stabilisant des carbures (ou antigraphitisant) énergique. Il forme avec le fer un sulfure FeS fragile qui se dépose aux joints des grains et diminue la résistance mécanique de l'alliage. Son action est neutralisée par le manganèse.

— *Manganèse :* Le manganèse est ajouté pour neutraliser l'action du soufre en formant du sulfure de manganèse MnS insoluble dans la fonte et inoffensif à l'état d'inclusions. On vise une teneur en manganèse voisine de 1,7 fois la teneur en soufre + 0,30 %, (car $\frac{\text{Mn}}{\text{S}} = \frac{55}{32} = 1{,}72$).

Lorsque cette teneur en manganèse dépasse cette valeur, cet élément à une action stabilisante : il affine la perlite et augmente légèrement la dureté de la fonte (fig. I-88).

— *Phosphore :* Le phosphore provient du minerai, principalement des minettes de l'Est qui en contiennent jusqu'à 2 %. Le phosphore améliore très sensiblement la coulabilité de la fonte jusqu'à une teneur de 0,8 % environ. Cependant, comme la fonte phosphoreuse est meilleur marché que la fonte hématite de haut fourneau, la teneur en phosphore des fontes grises, en France, peut atteindre 1,5 % pour la fabrication de pièces minces d'appareils de chauffage.

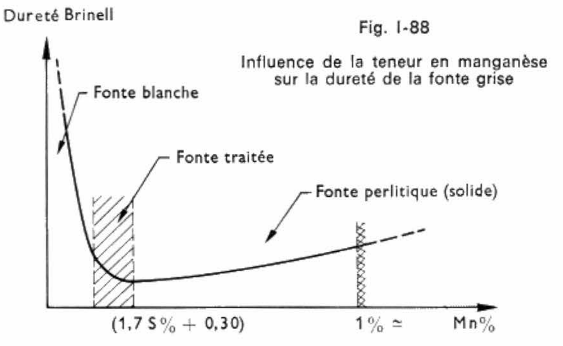


Fig. I-88

Influence de la teneur en manganèse sur la dureté de la fonte grise

Le phosphore forme avec le fer et le carbure de fer un eutectique complexe, la stéadite (Fe, Fe_3C, Fe_3P). À 953 °C, la stéadite se solidifie avec une augmentation notable de volume. L'effet conjugué de la diminution de volume au refroidissement de la fonte et de l'augmentation de volume à la solidification de la stéadite provoque des contraintes élevées que l'alliage ne peut supporter : il se produit des microcriques entre les cristaux et cela peut nuire à l'étanchéité de la pièce. Aussi, lorsque les pièces doivent présenter une parfaite étanchéité, la teneur en phosphore de la fonte doit-elle être limitée à 0,20 % au maximum (cependant, pour les pièces minces comme les radiateurs — épaisseur 3 mm environ — à solidification très rapide, on admet jusqu'à 1 % de phosphore).

La dureté Brinell de la stéadite est voisine de 600 ; l'augmentation de dureté de la fonte qui en résulte est de 30 points pour 1 % de phosphore, de sorte que les fontes à forte teneur en phosphore sont plus difficiles à usiner que les fontes de même composition chimique mais contenant peu de phosphore ($P \leqslant 0{,}10$ %).

L'eutectique phosphoreux est très fragile et le frottement sous pression élevée peut effriter les cristaux de stéadite : les débris entraînés par le lubrifiant vont provoquer une usure très rapide des parties frottantes et les mettre prématurément hors d'usage. Aussi, dans la fabrication des pièces comportant des parties frottantes, la teneur en phosphore est-elle limitée à 0,15 % au maximum. Par ailleurs, pour améliorer la tenue à l'usure, on admet jusqu'à 0,7 et même 1 %.

De même que le silicium, le phosphore déplace les points eutectique et eutectoïde vers la gauche du graphique (V. fig. I-82). L'équivalent en carbone du phosphore est de 0,33 fois la teneur en phosphore.

— *Carbone équivalent et indice de saturation :* Afin de comparer les fontes grises entre elles, on les assimile à un alliage binaire de même structure. Pour cela, on utilise, soit la notion de carbone équivalent (anglo-saxonne), $C_{éq}$ (ou équivalent en carbone), soit la notion d'indice de saturation (allemande) S_C ou degré de saturation eutectique D.S.E.

Le carbone équivalent $C_{éq}$ est donné par la relation :

$$C_{éq} = C_{total} + 0{,}312 \text{ Si \%} + 0{,}33 \text{ P \%} - 0{,}06 \text{ Mn \%}$$

(Si %, P % et Mn % représentant symboliquement les teneurs respectives en silicium, phosphore et manganèse).

Dans la pratique, on néglige la correction due au manganèse et la formule simplifiée devient :

$$C_{éq} = C_{total} + \frac{1}{3} (\text{Si \%} + \text{P \%})$$

La formule de l'indice de saturation S_C, simplifiée pour la même raison, est :

$$S_C = \frac{C_{total}}{4{,}23 - \frac{1}{3} (\text{Si \%} + \text{P \%})}$$

Le dénominateur de cette fraction représentant la teneur en carbone eutectique :

— pour $C_{éq} > 4{,}3$ % ou $S_C > 1$, la fonte est hypereutectique (H.E.) ;

— pour $C_{éq} = 4{,}3$ % ou $S_C = 1$, la fonte est eutectique (E) ;

— et pour $C_{éq} < 4{,}3$ % ou $S_C < 1$, la fonte est hypoeutectique (h.E.).

3° *Caractéristiques mécaniques.* — Les fontes grises sont définies par leur résistance à la traction, mesurée sur une éprouvette usinée dans un barreau de diamètre adapté à l'épaisseur déterminante des pièces et coulé à part.

La norme française NF A 32—101 de décembre 1965 prévoit sept qualités dont les résistances à la traction s'échelonnent (de 5 en 5) de 10 daN/mm² à 40 daN/mm².

Le diamètre des barreaux est indiqué par une des lettres suivantes : *A, B, C, D, E, S*. Leurs valeurs respectives sont : 9, 13, 20, 30 et 50 mm de *A* à *E*. Les dimensions du barreau *S* sont à convenir par accord entre les parties.

— *Corrélation entre les caractéristiques mécaniques et le carbone équivalent :* de nombreux chercheurs ont essayé de déterminer les caractéristiques mécaniques des fontes grises en fonction de leur dureté Brinell d'abord, puis de leur composition chimique. Pendant longtemps, la dispersion des résultats d'essais de traction exécutés sur des éprouvettes à têtes lisses, avait fait écarter cet essai pour la réception des lots de pièces en fonte. L'éprouvette à têtes filetées a permis de réduire, dans des limites acceptables, cette dispersion et l'épreuve de traction est mondialement utilisée aujourd'hui. En ce qui concerne la dureté Brinell, la présence d'eutectique phosphoreux dans la structure la fait varier (d'après la *British Cast Iron Research Association*) selon la relation :

$$\text{variation } H_B = 30 \text{ P \%}$$

Ainsi, la dureté Brinell mesurée peut être corrigée en fonction de la teneur en phosphore de la fonte. Il est alors possible de comparer les différentes nuances en se référant à une fonte de base ne contenant pas de phosphore :

$$H_B \text{ corrigée} = H_B \text{ mesurée} - 30 \text{ P \%}$$

Pour des fontes élaborées au cubilot et coulées directement dans les moules, sans inoculation (V. ci-après), dont les teneurs sont comprises entre les limites ci-après : 3,15 % $<$ C_t $<$ 3,60 % ; 1,60 % $<$ Si $<$ 2,70 % et 0,10 % $<$ P $<$ 1,70 %, les relations entre la dureté Brinell et les autres caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

$R_t = (0{,}2\,H_B \text{ corrigée} - 19 \pm 2{,}5)$ daN/mm² (coefficient de corrélation $r = 0{,}94$).

$$\text{Module d'élasticité} = [100 \left(\frac{H_B \text{ corrigée} + 150}{3}\right) \pm 500]$$

décanewtons par millimètre carré ($r = 0{,}90$).

Les essais ont porté sur des barreaux de 22 mm et 32 mm de diamètre, coulés dans des moules en sable vert, et sur des barreaux de 22 mm, 32 mm et 50 mm de diamètre, coulés dans des moules en sable étuvé. Les résultats obtenus ont permis d'établir les formules suivantes :

- Moules en sable vert :

$\varnothing$ 22 : H_B corrigée $= 655 - 100\,C_{éq} \pm 18$
$\varnothing$ 32 : H_B corrigée $= 645 - 100\,C_{éq} \pm 18$
$= 575 - 360\,S_C \pm 18$

- Moules en sable étuvé :

$\varnothing$ 22 : H_B corrigée $= 615 - 100\,C_{éq} \pm 8$
$\varnothing$ 32 : H_B corrigée $= 605 - 100\,C_{éq} \pm 10$
$= 535 - 360\,S_C \pm 10$
$\varnothing$ 50 : H_B corrigée $= 585 - 100\,C_{éq} \pm 14$
$= 515 - 360\,S_C \pm 24$

La différence de vitesse de refroidissement entre les barreaux de 22 mm et 32 mm de diamètre se traduit, tant en moule à vert qu'en moule étuvé, par une différence de dureté de dix points Brinell. La différence entre les duretés des barreaux de 22 mm, 32 mm et 50 mm de diamètre, en sable étuvé, est respectivement de 10, 20 et 30 points Brinell.

Ces résultats ont permis de tracer des abaques à points alignés permettant de déterminer les valeurs probables des caractéristiques mécaniques des fontes grises d'après les teneurs en carbone (C_t), silicium et phosphore, ou encore de déterminer le carbone équivalent ou l'indice de saturation à viser pour obtenir les caractéristiques mécaniques désirées (fig. I-89 et I-90).

4° *Fontes inoculées.* — En 1907, le colonel Herment, dirigeant l'arsenal de Douai, eut l'idée. de couler des obus en fonte. Pour la première fois de l'acier fut ajouté aux charges de fonte du cubilot et, comme la fonte liquide projetait de nombreuses étincelles — que l'on attribuait à l'oxydation de l'alliage —, il fit ajouter du ferro-silicium en grains dans la fonte liquide pendant le prélèvement : ainsi le colonel Herment inventait le principe même de l'inoculation.

Pendant toute la durée de la première guerre mondiale, la fabrication des obus en fonte aciérée ne fit que croître, en utilisant le même processus, sans que l'on sache quelle était l'influence de cette inoculation.

Aux États-Unis d'Amérique, en 1924, Meehan dépose de nombreux brevets d'invention relatifs à l'inoculation d'un grand nombre d'éléments dans la fonte liquide, dans le but d'obtenir des produits présentant des qualités améliorées comparativement à celles des fontes ordinaires. Les fontes obtenues par ce procédé furent qualifiées de fontes *Meehanite*, marque déposée en même temps que les brevets. Aujourd'hui, un grand nombre de fonderies *inoculent* leur fonte sans, toutefois, les qualifier de Meehanite, sauf si un accord préalable est signé avec la *Meehanite Metal Corporation*.

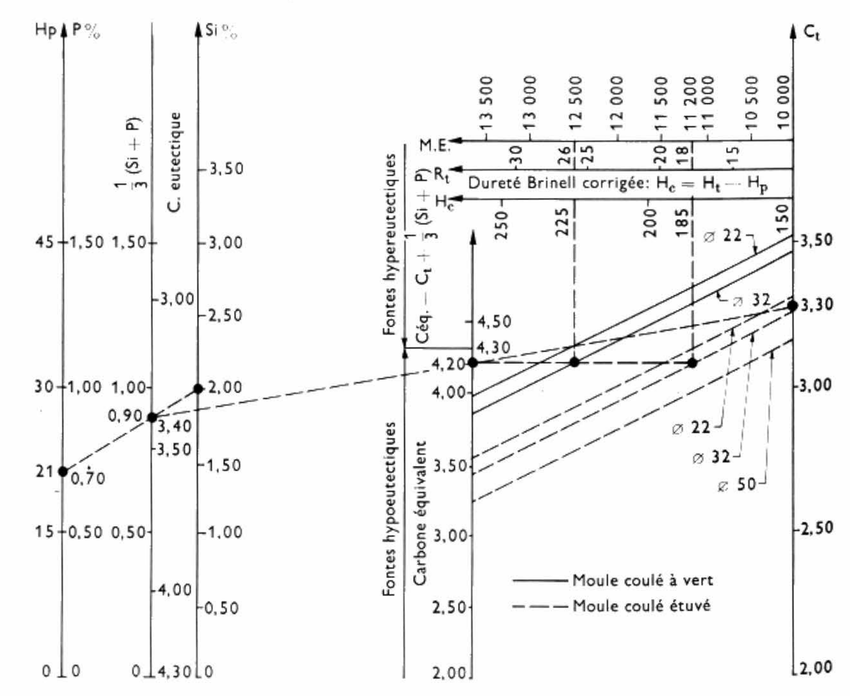


Fig. I-89

Diagramme relatif au carbone équivalent

H_c	Dureté Brinell corrigée
H_t	Dureté Brinell brute
H_p	Dureté due au phosphore
P%	Teneur en phosphore
Si%	Teneur en silicium
C_t	Carbone total
Ceq	Carbone équivalent
M.E.	Module d'élasticité

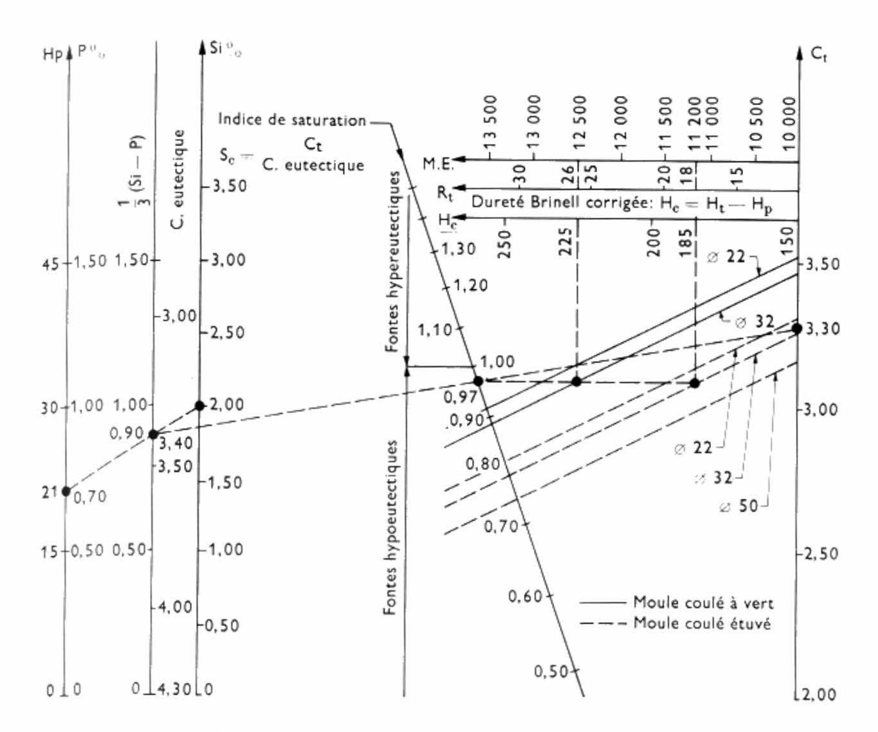


Fig. I-90

Diagramme relatif à l'indice de saturation

Intérêt de l'inoculation. — Lorsque deux fontes, élaborées avec les mêmes matières premières, sont coulées dans des moules identiques, l'une ayant une teneur initiale en silicium de 2 %, par exemple, l'autre ayant une teneur initiale en silicium inférieure, par exemple 1,80 % mais recevant par addition à la poche le complément nécessaire pour atteindre la teneur de 2 %, on constate que les pièces coulées présentent des caractéristiques mécaniques différentes. Le graphite est plus fin et beaucoup mieux réparti dans la fonte inoculée que dans la fonte coulée telle qu'elle est prélevée du cubilot. Les caractéristiques mécaniques des fontes inoculées sont de 20 à 40 % supérieures à celles des fontes grises de même composition chimique. Plusieurs hypothèses qu'il serait trop long de développer ici sont avancées pour expliquer ce phénomène.

5° *Fontes à graphite sphéroïdal.* — Depuis Antoine Ferchauld de Réaumur, qui donna en 1722 les bases techniques pour la fabrication de pièces en fonte malléable à cœur blanc, par décarburation de la fonte à l'état solide, et de l'acier, par décarburation de la fonte à l'état liquide (procédé qui fut utilisé pour la première fois en 1865 par l'ingénieur Martin à Sireuil, dans les Charentes), les métallurgistes cherchaient à obtenir, à l'état brut de coulée, une fonte qui présenterait les avantages d'élaboration et de coulabilité de la fonte grise et des caractéristiques mécaniques, résistance et ductilité, proches de celles de l'acier.

— *Procédé au cérium :* vers 1945, l'organisme anglais de recherches sur la fonte (*British Cast Iron Research Association*), grâce à une addition de cérium dans une fonte de base hyper-eutectique ($C_{éq} > 4{,}3$ %) suivie d'une inoculation de ferro-silicium, obtenait pour la première fois une fonte dont le graphite se présentait sous forme de nodules sphéroïdaux à contours lisses, identiques à ceux que l'on rencontrait parfois dans la structure de certaines fontes malléables à cœur blanc.

Les caractéristiques de cette fonte étaient très sensiblement supérieures à celles des fontes grises à graphite lamellaire.

Cette fonte fut appelée fonte à graphite sphéroïdal ou, par suite de la ductibilité qu'elle présentait à l'état brut de coulée, fonte ductile (*ductile iron*).

— *Procédé au magnésium :* quelques années plus tard, vers 1947, l'*International Nickel Company Inc.*, aux États-Unis d'Amérique, obtenait le même résultat avec une addition de magnésium dans la fonte liquide hypo-eutectique ($C_{éq} < 4{,}3$ %) suivie d'une inoculation de ferro-silicium. La basse température d'ébullition du magnésium (1101 °C) nécessita d'utiliser un alliage de nickel-magnésium 85/15 ou 90/10 afin d'éviter la projection de la fonte hors de la poche de traitement sous la pression de la vapeur de magnésium (10 atmosphères environ à 1 500 °C).

L'addition du cérium ou du magnésium a trois effets principaux sur la fonte :

— désulfurant :

$Ce + FeS \rightarrow CeS + Fe$

$Mg + MnS \rightarrow MgS + Mn$

— désoxydant : Ce (ou Mg) + O → CeO (ou MgO)

— stabilisant : le cérium et le magnésium sont des stabilisants des carbures. En l'absence d'addition, si la fonte de base se solidifiait en suivant le diagramme stable fer-graphite et donnait une structure de fonte grise, l'addition de cérium et de magnésium aurait pour effet de la faire solidifier en suivant totalement ou partiellement le diagramme métastable fer-carbure de fer et sa structure serait blanche ou truitée. Pour obtenir une structure grise, exempte de cémentite libre, il faut une inoculation de ferro-silicium postérieure à l'addition de cérium ou de magnésium et dont l'importance est fonction de la vitesse de refroidissement de la fonte dans le moule, donc de la nature du moule et de l'épaisseur de la pièce coulée.

Le prix élevé du cérium a fait abandonner ce procédé malgré l'économie obtenue par la substitution du mischmetal (50 % Ce) au cérium pur ; le prix du mischmetal est environ le quart de celui du cérium.

Le procédé utilisé actuellement est celui au magnésium : ajouté sous forme de ferro-silicium-magnésium (Fe : 45 %, Si : 45 %, Mg : 10 %) suivie de l'inoculation de ferro-silicium.

Caractéristiques mécaniques des fontes à graphite sphéroïdal normalisées en France

Qualité	Résistance à la traction (en décanewtons par millimètre carré)	Limite d'élasticité (en décanewtons par millimètre carré) (à 0,2 %)	Allongement (longueur initiale = 5d)	Constituants prédominants de la structure (à titre indicatif)	Dureté Brinell
FGS 70-2	68,6	46,1	2 %	Perlite	230-300
FGS 60-2	58,2	39,2	2 %	Perlite	220-270
FGS 50-7	49	34,3	7 %	Ferrite-Perlite	200-240
FGS 42-12	41,2	27,4	12 %	Ferrite	140-190
FGS 38-15*	37,2	23,5	15 %	Ferrite	140-190

* L'essai de résilience peut être imposé pour cette qualité

Cet essai est effectué conformément à la norme française NF A 03—156, essai de résilience Charpy de l'acier, la pro-

fondeur de l'entaille de l'éprouvette étant toutefois de 2 mm au lieu de 5 mm. Il est recommandé d'utiliser un mouton-pendule de (49 ± 2) joules. La valeur moyenne (sur trois essais) de la résilience obtenue ne doit pas être inférieure à 1,7 daJ/cm². La valeur individuelle ne doit pas être inférieure à 1,5 daJ/cm².

5.1.3. Fontes spéciales ou alliées. — La Commission technique des fontes spéciales du Centre technique des industries de la fonderie, modifiant légèrement un vœu adopté par le Congrès international des mines, de la métallurgie et de la géologie appliquée (octobre 1935) a établi le texte suivant qui définit les fontes spéciales (quelquefois appelées fontes alliées).

Les fontes spéciales comportent des éléments n'entrant pas habituellement dans la composition des fontes de moulage, l'addition de ces éléments étant volontairement effectuée dans le but d'obtenir des propriétés particulières :

— résistance mécanique élevée à la température ordinaire et à chaud ;

— faible corrodabilité dans les milieux liquides ou gazeux ;

— résistance à l'oxydation et stabilité aux températures élevées ;

— dilatabilité, résistivité et autres propriétés physiques de valeur déterminée.

Les taux limites, au-dessus desquels les éléments spéciaux les plus habituels sont considérés comme ajoutés volontairement sont :

Ni	Cr	Cu	Ti	V	Mo	Al
0,30 %	0,20 %	0,30 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %

Toutefois, dans le cas où deux de ces éléments, ou plus, sont présents simultanément, la fonte est considérée comme spéciale lorsque le total des fractions obtenues, en portant comme dénominateurs les chiffres ci-dessus et comme numérateurs les taux contenus, est plus grand que 1.

Seront toutefois préjugés additions involontaires et ne participeront pas au calcul précité, les éléments spéciaux dont la teneur reste individuellement inférieure aux deux tiers des taux limites indiqués.

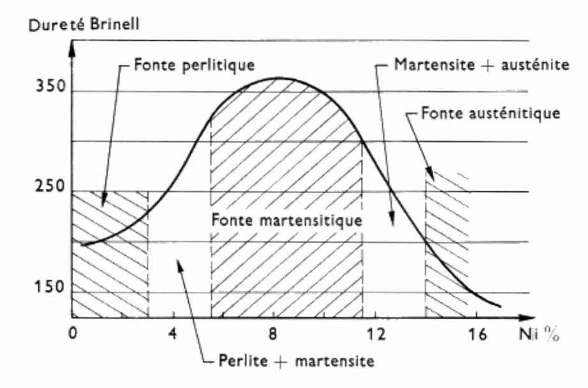


Fig. I-91 — Influence du nickel

Par ailleurs, sont qualifiées de spéciales les fontes contenant plus de 5 % de silicium ou de 1,5 % de manganèse.

1° *Applications des fontes spéciales ou alliées.* — L'addition d'éléments spéciaux dans une fonte de base, contenant outre du silicium, du manganèse, du soufre et en quantité limitée du phosphore, modifie d'une manière plus ou moins sensible, ses qualités physiques, chimiques, mécaniques, électriques, etc., de telle sorte que les fontes spéciales se substituent progressivement à d'autres matériaux dans les diverses branches de l'industrie : automobile, machines-outils, travaux publics, électricité, génie chimique, etc. par suite de la facilité avec laquelle il est possible d'obtenir des formes compliquées par moulage et coulée.

Pour l'élaboration de ces fontes spéciales, on fait appel le plus souvent au cubilot et, dans certains cas, aux fours rotatifs chauffés au fuel ou aux fours électriques à arc ou à induction.

2° *Influence des différents éléments d'addition sur la structure.* — Cette influence peut se manifester, pendant le refroidissement de la fonte, soit au moment de la solidification et du refroidissement qui lui fait suite (certains éléments sont des graphitisants et d'autres des antigraphitisants), soit au moment de la transformation du fer γ en fer α : certains éléments favorisent la transformation du fer γ en fer α (ce sont les alphagènes ou α gènes), et d'autres ont tendance à maintenir le fer dans la phase γ (ce sont les gammagènes ou γ gènes).

Le tableau ci-dessous classe les différents éléments courants en fonction de leur influence sur la graphitisation et sur la transformation du fer γ en fer α.

Éléments	Graphitisants	Antigraphitisants	Alphagènes	Gammagènes
Si	+		+	
Al	+		+	
Ti	+		+	
Ni	+			+
Cu	+			+
Mn		+		+
Mo		+	+	
Cr		+	+	
V		+	+	

Remarque : Certains éléments comme le nickel et le cuivre sont graphitisants et gammagènes : ainsi leur action semble opposée car ils procèdent du diagramme stable pendant la solidification de l'alliage et le refroidissement qui lui fait suite, puis du diagramme métastable au moment de la transformation du fer γ en fer α. En agissant de la sorte, ils permettent d'éviter la formation de cémentite primaire à la solidification et pendant le refroidissement ultérieur (cémentite eutectique et proeutectoïde) et ils s'opposent à la précipitation de ferrite proeutectoïde au passage du fer γ en fer α. Cette propriété est utilisée lorsque la fonte est destinée à la coulée de pièces qui doivent présenter une bonne résistance à l'usure par frottement, comme les blocs-cylindres de moteurs à explosion ou les glissières de machines-outils, par exemple.

— *Nickel :* le nickel se comporte comme un graphitisant jusqu'à 3 % environ et la fonte a une structure perlitique ; dissous dans la matrice, il en augmente la dureté Brinell d'environ 30 points chaque fois que la teneur en nickel croît de 1 %. Ensuite on voit apparaître de la martensite. À partir de 7 % et jusqu'à 11 %, la structure est entièrement martensitique ; la dureté Brinell atteint 700 daN/mm² vers 9 %, puis diminue progressivement. À partir de 11 %, la martensite cède progressivement la place à l'austénite et la structure devient entièrement austénitique au-dessus de 14 % de nickel (fig. I-91). Le nickel affine le grain et le graphite, ainsi que les carbures dans le cas des fontes trempées. Il diminue très fortement la sensibilité à l'épaisseur des fontes. Il est couramment utilisé conjointement avec le chrome : 3 parties de nickel pour 1 partie de chrome.

— *Chrome :* à faible teneur, le chrome corrige les irrégularités de la composition chimique de la fonte. Il permet d'obtenir des profondeurs de trempe régulières et de supprimer la précipitation de graphite primaire dans les fontes blanches destinées à la fabrication des pièces résistant à l'abrasion. À teneur élevée (supérieure à 14 %) la structure devient ferritique et, en présence de gaz oxydants à haute température, il se forme une pellicule d'oxyde de chrome imperméable qui s'oppose au cheminement de l'oxydation. La composition type pour cet alliage ferritique au chrome est : $C_t \leqslant 1{,}50\,\%$; $Si \leqslant 1{,}70\,\%$; $Mn \leqslant 1{,}00\,\%$ et $28{,}00\,\% \leqslant Cr \leqslant 32{,}00\,\%$. La principale application concerne les pièces de fours de traitement thermique. À partir de 0,20 %, le chrome stabilise la perlite et, en s'opposant à sa décomposition à température élevée, évite le gonflement des pièces qui accompagne la décomposition des carbures.

— *Cuivre :* le cuivre est un graphitisant au moment de la solidification, mais cinq fois moins efficace que le silicium. À la température de la transformation du fer γ en fer α, le cuivre est gammagène ou antiferritisant; dans une large mesure, il évite la précipitation de cémentite eutectoïde ou proeutectoïde, et vers 725 °C il s'oppose à la précipitation de ferrite eutectoïde, de sorte que la structure finale est perlitique.

Le cuivre est soluble dans la fonte liquide jusqu'à 3 % environ mais cette solubilité n'est plus que de 1,5 % dans la fonte solide, pourcentage avec lequel on obtient les avantages optimaux. Les caractéristiques mécaniques H_B et R_t sont améliorées : 1 % de cuivre augmente la dureté Brinell de 20 points environ et la résistance à la traction de 2 daN/mm² environ.

— *Molybdène :* le molybdène est antigraphitisant et alphagène. Il augmente la profondeur de trempe et son action est le tiers de celle du chrome. Il augmente la résilience et la résistance à l'usure des fontes. Le molybdène à faible teneur (1 % au maximum) retarde la transformation de l'austénite et déplace, en la modifiant, la courbe de début de transformation vers la droite du graphique (V. fig. I-82). Cette propriété permet d'obtenir une structure bainitique à l'état brut de fonderie pour certaines compositions. Le molybdène peut remplacer une partie du nickel dans les fontes martensitiques du type nickel-chrome.

— *Vanadium :* c'est un puissant stabilisateur des carbures et il augmente sensiblement la profondeur de trempe. Le vanadium affine la structure de trempe. Son action stabilisante des carbures doit être tempérée par une teneur plus élevée en carbone (C_t) ou en silicium ou par une addition de nickel ou de cuivre dans la coulée des pièces de faible section.

— *Tellure :* le tellure a un très grand pouvoir antigraphitisant; aussi, son emploi demande-t-il un soin extrême pour obtenir le but recherché. Son usage est normalisé pour la fabrication des roues de wagon trempées aux États-Unis d'Amérique.

— *Bore :* le bore a un champ d'application limité; il est utilisé pour augmenter la dureté et la résistance à la traction des fontes grises et la dureté des parties blanches des fontes trempées. 1 % de bore, ajouté à une fonte blanche non alliée, augmente sa dureté Brinell de 150 points environ; en revanche, la résistance à la rupture par flexion est réduite d'environ 40 %.

— *Titane :* le titane est un graphitisant (valeur graphitisante : 0,4 fois celle du silicium). Mais il joue surtout un rôle de désoxydant, désulfurant et désazoturant. Il affine le graphite mais il diffuse difficilement. Sa teneur courante est de 0,20 à 0,30 % dans les fontes.

— *Aluminium :* l'aluminium est un graphitisant jusqu'à 2 % (valeur graphitisante : 0,5 fois celle du silicium) et un désoxydant énergique. Ajouté dans une proportion de 1 à 1,50 % lors de la fabrication des pièces en fonte nitrurée, conjointement avec le chrome (1,5 à 2 %), l'aluminium permet d'atteindre une dureté Brinell voisine de 700, après un maintien de 8 heures à 525 °C $\pm$ 5 °C dans une atmosphère d'ammoniac craqué.

— *Silicium :* lorsque les teneurs en silicium sont importantes (6 % environ) la fonte devient ferritique et, en présence de gaz oxydants à chaud, elle se recouvre d'une pellicule de silice, SiO_2, imperméable qui s'oppose à la pénétration de l'oxydation. De plus, la structure ferritique lui confère une résistance remarquable vis-à-vis des changements brusques de température et en fait un matériau excellent pour les fours de traitements thermiques. Avec 14 % de silicium environ, la fonte (qui est alors un véritable ferro-silicium) résiste parfaitement à la corrosion par les acides sulfurique et nitrique concentrés ou étendus. Pour l'acide chlorhydrique, la composition chimique doit être modifiée : silicium : 14 à 17 %, molybdène : 3,5 %. Ces alliages au silicium résistent également très bien aux acides organiques. Ils sont particulièrement fragiles et les pièces doivent être parfaitement dessinées afin d'éviter une rupture intempestive sous l'effet des tensions internes qui pourraient découler des variations brusques d'épaisseurs.

— *Manganèse :* le manganèse est un antigraphitisant; son effet est annulé dès que la teneur en silicium atteint le quart de la teneur en manganèse.

Il affine la perlite et, au-dessus de 1 %, la structure tend à devenir sorbitique. Il facilite les traitements thermiques et la trempe martensitique. Il est ajouté aux fontes alliées contenant des éléments coûteux (nickel, molybdène, chrome) car il permet de réduire leurs teneurs et d'obtenir le même effet plus économiquement.

Le tableau de la page suivante indique les compositions et des exemples d'emploi de ces fontes spéciales.

5.2. Les aciers moulés. — Les aciers sont des alliages fer-carbone dont la teneur en carbone reste inférieure à 2 %. Les variations de la teneur en carbone modifient, dans une large mesure, les caractéristiques mécaniques du métal.

Par suite de leur origine métallurgique, les aciers contiennent également du silicium (environ 0,30 %), du manganèse (0,50 à 0,60 %), du soufre (teneurs fixées par les normes : maximale $< 0{,}10$ %, courante $< 0{,}05$ % et, pour les aciers de haute qualité, $< 0{,}01$ %) et du phosphore (couramment moins de 0,05 %).

5.2.1. Aciers au carbone non alliés. — Selon leur teneur en carbone, ces aciers sont classés en acier doux, demi-doux, demi-dur et dur; leur composition est donnée par le tableau ci-après :

Aciers non alliés	Pourcentages				
	Carbone	Silicium	Manganèse	Soufre	Phosphore
doux	< 0,20	0,20 à 0,75	0,5 à 1,0	< 0,05	< 0,05
demi-doux	0,20 à 0,35	0,20 à 0,75	0,5 à 1,0	< 0,05	< 0,05
demi-dur	0,35 à 0,50	0,20 à 0,75	0,5 à 1,0	< 0,05	< 0,05
dur	> 0,50	0,20 à 0,75	0,5 à 1,0	< 0,05	< 0,05

Le tableau ci-après indique les teneurs en carbone limites ainsi que les propriétés mécaniques des principales nuances utilisées (pour les désignations conventionnelles des métaux et alliages, se reporter à la norme NF A 02-001).

Aciers de construction au carbone pour moulage				
Nuances	Teneur en carbone (pourcentage)	A l'état recuit		
		R	Re	A (pourcentage)
		(décanewtons par millimètre carré)		
Aciers à haute perméabilité	< 0,12			
A 40 M A 48 M A 56 M A 65 M	de 0,15 à 0,45	de 40 à 70	de 20 à 35	de 22 à 10

5.2.2. Aciers alliés ordinaires. — Afin d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques (à la température ordinaire ou à chaud) et leur résistance vis à vis de certaines corrosions, des éléments spéciaux, tels que le nickel, le chrome, le molybdène, le tungstène, le vanadium, le cuivre et l'aluminium, sont ajoutés volontairement aux aciers, qui sont alors appelés *aciers alliés.*

— *Nickel :* il améliore la résistance de l'acier à la fatigue et aux chocs. La teneur courante est comprise entre 1,5 et 4 %, et il est ajouté avec un peu de chrome et de molybdène.

Dans les aciers inoxydables, le nickel donne une structure austénitique (à partir de 8 % environ), stable à la température ambiante, malgré la présence de chrome qui est alphagène. Il améliore ainsi la résistance à l'oxydation et à la corrosion.

Dans certains aciers spéciaux la teneur en nickel peut atteindre 35 %.

Exemples de fontes spéciales ou alliées

Classe de fonte	Catégorie	Composition chimique en pourcentage								Caractéristiques		Exemples d'emploi
		C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Al	R_t (daN/mm²)	H_B (daN/mm²)	
À haute résistance	à faibles teneurs en nickel et chrome	3,2 3,00	1,2 2,2	0,6 0,8	0,05 0,12	< 0,30	1,2 2,4	0,4 0,8	—	25 35	220 270	Cylindres à ailettes, carters moteurs, bâtis de machines, de moteurs, etc.
Bainitiques ou aciculaires		2,9 3,1	1,6 2,6	0,8 1,2	⩽ 0,15	⩽ 0,10	1,0 4,5		Mo 1,0	40 à 60	300 350	Filières, vilebrequins de moteurs Diesel marins, navettes, etc.
Résistant à l'usure par abrasion	sorbitique ou martensitique	3,0 4,0	0,5 1,5	0,5 1,5	⩽ 0,10	⩽ 0,10	2,0 6,0	0,5 2,5	Mo 2,0		> 450	Corps broyants de cimenterie, vis de transporteurs, éléments de broyeurs, grilles de machines à grenailler, outillage de machines à briques, céramiques, pompes (corps et roue) d'exhaure, etc.
Résistant à l'usure par frottement	fonte nitrurée	2,6 2,9	2,4 2,7	0,9 1,1	⩽ 0,10	⩽ 0,10	—	1,5 2,0	1,0 15		320 350	Chemises de camions et de voitures de compétitions, etc. traitement = *plusieurs heures* à (525 ± 5) °C, suivant la dureté désirée, dans une atmosphère d'ammoniac craqué.
Résistant à chaud	à haute teneur en silicium	2,70	5,5 6,5	0,30 0,50	⩽ 0,10	⩽ 0,10	—	—	—	16 à 18	180 300	Maillons de chaîne pour fours de traitements thermiques, grilles, creusets de fours de maintien de coulée sous pression, etc.
	à haute teneur en chrome	⩽ 1,50	⩽ 1,70	⩽ 1,0	⩽ 0,10	⩽ 0,10	—	28,0 32,0	—	32 à 36		
Résistant à diverses corrosions	austénitiques au nickel et au chrome	2,6 3,0	1,5 2,7	1,0 2,0	⩽ 0,10	⩽ 0,2	14,0	1,50 4,0	Cu 6	22 à 25	130 160	Moules de verrerie, supports de surchauffeurs, cuves et pièces diverses pour l'industrie chimique.

— *Chrome :* il favorise la pénétration de la trempe et le durcissement du métal. Dans les aciers de construction la teneur courante varie de 0,5 à 1,5 %.

En milieu oxydant, l'acier au chrome (Cr > 12 %) se recouvre d'une couche d'oxyde adhérente, dense et imperméable, qui s'oppose à la pénétration de l'oxydation : on dit que l'alliage se passive. Jusqu'à une température d'utilisation de l'acier de 550 °C, on ajoute environ 5 % de chrome. Dans les nuances d'aciers inoxydables, au nickel et au chrome, les teneurs en chrome courantes sont de 18 % (avec 8 % de nickel : acier 18/8) et de 25 % (avec 12 % de nickel : acier 25/12, et avec 20 % de nickel : acier 25/20).

Les alliages ferritiques réfractaires avec 15 à 18 % de chrome résistent bien à la corrosion à froid par l'acide nitrique, l'acide phosphorique et les acides organiques (acétique, citrique, tartrique). Avec 25 à 30 % de chrome et 0,30 % de carbone, ils sont utilisés comme alliages réfractaires jusqu'à 1 150 °C pour les caisses de traitement thermique, les récupérateurs de chaleur, les pièces de fours, etc. ; ils résistent à la corrosion par les gaz sulfureux et sulfurique contenus dans les fumées ; alliés à l'aluminium (3 à 6 %), la température d'utilisation peut être portée à 1 300 °C environ.

— *Molybdène :* il améliore la résilience des aciers, surtout à chaud. Dans les aciers de construction, la teneur courante est comprise entre 0,3 et 1 %. Pour des aciers qui doivent résister à certaines corrosions, la teneur peut atteindre 2 à 5 %.

Le molybdène améliore également la résistance des aciers au fluage.

— *Vanadium :* une addition de 0,4 % de vanadium dans un acier à 0,5 % de molybdène améliore très sensiblement sa résistance au fluage.

— *Cuivre :* l'addition du cuivre dans les aciers est limitée car sa solubilité ne dépasse pas 1,5 % à l'état solide. Il améliore les caractéristiques mécaniques à partir de 0,3 %. Il améliore également la résistance à la corrosion par les agents atmosphériques ; allié au manganèse (0,5 à 1,0 %), le cuivre (0,5 à 1,2 %) a une influence très marquée sur l'amélioration de la résistance de l'acier.

Aciers de construction alliés pour moulage

Éléments d'addition	Symbole	Analyse (pourcentage)				Caractéristiques					Applications
						Normalisés et revenus				Traités	
		C	Ni	Cr	Mo	R (1)	R_e (1)	A (2)	K (3)	Dureté Brinell Bille de 10 mm (1)	
Cr	35 C 4-M	0,35	—	1	—	70	35	12	4	—	Ces aciers à haute résistance résistent en particulier à l'usure et à la fatigue
Cr-Mo	30 CD 4-M	0,30	—	1	0,25	70	35	12	5	250/350	
Ni-Cr-Mo	30 NCD 4-M	0,30	1	0,60	0,30	75	40	12	5	300/400	
»	30 NCD 8-M	0,30	2	0,80	0,30	75	40	12	6	350/450	
»	35 NCD 16-M	0,35	4	1,20	0,40	90	50	10	6	400/500	

(1) En décanewtons par millimètre carré (2) Pourcentage (3) Résilience

— *Aluminium :* il est nécessaire d'ajouter 1 % d'aluminium en même temps que 1 à 1,5 % de chrome dans les aciers que l'on veut *nitrurer*. La nitruration, qui consiste à maintenir les pièces à (525 ± 5) °C dans une atmosphère d'ammoniac craqué pendant une durée variant de 12 à 48 heures suivant la profondeur nitrurée désirée (0,015 à 0,07 mm), permet d'obtenir des duretés superficielles équivalentes à 700 daN/mm², par traitement thermique sans trempe.

— *Nuances usuelles :* le tableau précédent, donne les compositions chimiques des aciers alliés les plus couramment employées en fonderie d'acier.

5.3. Les alliages cuivreux

5.3.1. Généralités. — Les alliages cuivreux contiennent plus de 50 % de cuivre, de sorte que leurs propriétés découlent en partie de celles du cuivre et varient en fonction de la nature et de la teneur des éléments d'addition.

1° *Alliages de base.* — Le cuivre forme, avec un autre élément prépondérant, les cinq alliages de fonderie suivants :

— *Les cuivres :* ils contiennent au moins 95 % de cuivre et au plus 5 % d'éléments ajoutés volontairement en vue de modifier une ou plusieurs propriétés particulières.

— *Les bronzes :* alliages cuivre-étain avec quelques éléments complémentaires qui modifient une ou plusieurs propriétés.

— *Les laitons :* alliages cuivre-zinc avec d'autres éléments d'addition en faible teneur.

— *Les cupro-nickels :* alliages cuivre-nickel avec quelques autres éléments d'addition.

— *Les cupro-aluminiums :* alliages cuivre-aluminium avec du fer et du nickel en faible teneur.

2° *Propriétés du cuivre*

a) *Mécaniques :*

	Électro-lytique	Écroui	Recuit
Résistance à la rupture par traction	15 daN/mm²	39 daN/mm²	23 daN/mm²
Limite élastique	4 daN/mm²	28 daN/mm²	3 daN/mm²
Allongement	35 %	10 %	50 %
Dureté Brinell	40 daN/mm²	190 daN/mm²	40 daN/mm²

b) *Métallurgiques.* — Le cuivre chauffé s'oxyde au contact de l'oxygène de l'air suivant la réaction : $2\,Cu + O_2 \rightarrow 2\,CuO$ jusqu'à 300 °C.

Au-dessus de cette température, le cuivre sous-jacent réagit avec le mono-oxyde de cuivre pour donner de l'hémi-oxyde de cuivre : $Cu + CuO \rightarrow Cu_2O$.

Au cours de la fusion, le cuivre chauffé peut être en contact avec la vapeur d'eau de l'air et avec le gaz carbonique et l'anhydride sulfureux des gaz de combustion. Les réactions suivantes peuvent se produire :

$$2\,Cu + H_2O \rightarrow Cu_2O + H_2 \nearrow$$
$$2\,Cu + CO_2 \rightarrow Cu_2O + CO$$
$$6\,Cu + SO_2 \rightarrow Cu_2S + 2\,Cu_2O$$

Rochage : à la température de fusion, l'hydrogène et l'oxyde de carbone peuvent se dissoudre dans le cuivre (H_2 se dissocie et donne deux atomes d'hydrogène). Cette solubilité augmente avec la température (fig. I-92). Pendant le refroidissement, la solubilité diminue progressivement à l'état liquide, pour devenir nulle à l'état solide. L'hydrogène, ou l'oxyde de carbone, se dégage dans la partie intérieure des pièces encore liquide pour créer des soufflures endogènes ou congénitales : dans les alliages cuivreux ce défaut prend le nom de rochage.

Oxydation-réduction : en présence d'hémi-oxyde de cuivre Cu_2O dans le bain, la solubilité de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone diminue. Elle devient sensiblement nulle pour 0,5 % d'hémi-oxyde de cuivre (soit 0,05 % environ d'oxygène dans le bain). On oxyde préalablement

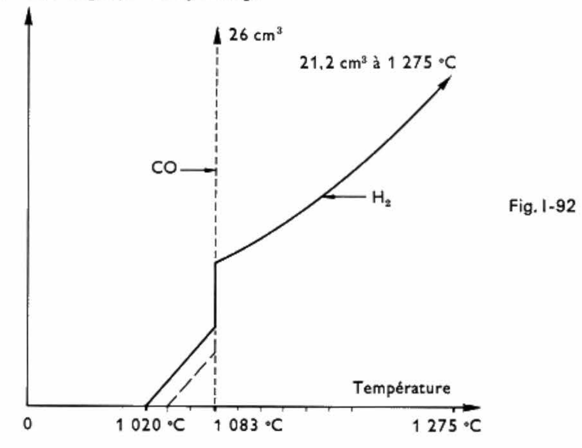


Fig. I-92

Solubilité de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone dans le cuivre

le bain pour former de l'hémioxyde à l'aide d'un flux oxydant puis, avant la coulée, le bain est désoxydé par addition de phosphure de cuivre, de zinc, de magnésium ou de silicium, suivant la nature et l'utilisation de l'alliage. Cette technique d'élaboration des alliages cuivreux a pris le nom de méthode d'*oxydation-réduction*.

3° *Élaboration et coulée des alliages cuivreux.* — Les propriétés métallurgiques du cuivre obligent à prendre les précautions suivantes :

a) Éviter tout contact avec la vapeur d'eau, avec les hydrocarbures et avec les gaz de combustion ; pour cela :

— il faut chauffer le creuset au rouge cerise avant de charger le métal ;

— les constituants de la charge doivent être parfaitement secs et sans souillures de graisses, d'huiles ou d'hydrocarbures ;

— le creuset doit être couvert afin d'éviter le contact du bain avec l'air et les gaz de combustion ;

— dès qu'il se forme, le bain doit être recouvert d'un flux protecteur et oxydant de façon à ce qu'il se forme de l'hémioxyde de cuivre Cu_2O ;

— éventuellement, la flamme du brûleur doit être réglée de façon à être légèrement oxydante.

b) Lorsque la température de coulée est atteinte, le bain est écumé et recouvert de charbon de bois en ignition. À l'aide d'un agitateur à cloche ou d'un ringard, poteyés et bien secs, on désoxyde le bain avec du zinc ou du magnésium ou du silicium ou du phosphure de cuivre à 15 % de phosphore, suivant l'alliage élaboré.

c) Après écumage soigné, on procède à la coulée dans les moules (il faut noter que le magnésium présente l'inconvénient de diminuer la coulabilité de l'alliage). Si l'alliage est prélevé à la poche, il faut chauffer préalablement celle-ci au rouge vif et la désoxydation se poursuit durant le transvasement en ajoutant l'élément réducteur dans la poche.

La coulée peut être faite dans des moules en sable vert ou en sable étuvé. Dans le cas des moules en sable vert, il est avantageux de les enduire au pistolet d'un mélange de gomme laque (50 g par litre) et d'alcool méthylique ayant en suspension un produit inerte comme du graphite ou de la brique finement pulvérisée (ocre). Le moule doit être parfaitement flambé immédiatement avant la coulée.

5.3.2. Les cuivres (norme NF A 53-100). — Ces alliages, faiblement alliés, contiennent plus de 95 % de cuivre.

Affinage : La fusion est conduite en allure légèrement oxydante. Dès que le bain est formé, les éléments dissous indésirables sont oxydés par injection d'air. Le soufre s'élimine en dernier. En fin d'opération, le bain peut contenir jusqu'à 1 % d'oxygène sous forme d'hémioxyde de cuivre Cu_2O. On le réduit par perchage (branche de bouleau vert) ou à l'aide de charbon de bois sec. Le brassage est poussé jusqu'à l'obtention du point d'affinage : l'alliage contient alors entre 0,02 et 0,05 % d'oxygène.

Il est aussitôt coulé sous des formes diverses qui dépendent de l'utilisation ultérieure prévue.

On distingue :

— Les *cuivres purs* destinés à être transformés par filage, étirage, laminage.

— Les *cuivres spéciaux courants* faiblement alliés (au zinc, à l'étain, au plomb, au nickel ou au cobalt) dans le but d'en faciliter l'élaboration ou la coulée ou d'en améliorer certaines caractéristiques.

— Les *cuivres au silicium*. Le silicium a un effet durcissant. Il est ajouté sous forme de cupro-silicium, quelquefois avec du fer, du nickel ou du cobalt.

— Les *cuivres au glucinium* (ou béryllium). Le glucinium améliore nettement les propriétés mécaniques du cuivre, dans les pièces ou les demi-produits, pour des teneurs comprises entre 0,5 et 2,5 %. Il est ajouté sous forme de cupro-glucinium (10 à 15 % de glucinium).

— Les *cuivres spéciaux divers :*

a) cuivre au cadmium, contenant de 0,5 à 1 % de cadmium et utilisé pour les conducteurs téléphoniques sous le nom de *bronze téléphonique*.

b) cuivre au manganèse : cuivre manganésé avec 0,5 à 1 % de manganèse et bronze au manganèse avec 4 % de manganèse et 1 % de fer. Le manganèse est ajouté lorsque le cuivre est liquide, par petite quantité, sous forme de cupro-manganèse à 15 % ou à 25-30 % de manganèse. Le bain est brassé avec un agitateur de plombagine, puis écumé soigneusement. Il est recouvert de charbon de bois sec et sa température est portée à 1 200 °C. La coulée est effectuée après désoxydation à l'aide de 0,1 % de phosphure de cuivre.

c) cupro-plomb (norme NF A 53-751) : le cuivre et le plomb n'étant pas miscibles à basse température, le cuivre est d'abord fondu, puis on ajoute le plomb nécessaire pour atteindre la teneur prévue. Le bain, recouvert de borax sec (2 % du poids de l'alliage), est porté à 1 300 °C environ et brassé énergiquement avec un agitateur de plombagine afin d'homogénéiser l'alliage. Après désoxydation, avec 0,1 à 0,15 % de phosphure de cuivre, l'alliage est coulé après un écumage soigné. Le métal coulé doit être refroidi le plus rapidement possible afin d'empêcher la *liquation* du plomb.

5.3.3. Les bronzes (norme NF A 53-707). — Les bronzes contiennent de 75 à 95 % de cuivre. À partir de 12 % d'étain, il se forme un constituant δ très dur et cassant, qui donne une grande sonorité à l'alliage : les bronzes à fortes teneurs en étain sont utilisés pour la fabrication des cloches (cuivre 75 à 80 %, étain 20 à 25 %). L'étain est ajouté sous forme d'alliage mère à 67 % d'étain et 33 % de cuivre. Les charges sont constituées, soit avec des produits purs (cuivre de cathode et alliage mère étain-cuivre) complétés par 50 à 70 % de déchets au titre, soit avec des lingots d'affinerie et des déchets au titre.

(Pour les compositions chimiques des bronzes normalisés, il est conseillé de se reporter à la norme française NF A 53-707).

Premier cas : produits purs. — Les flux à utiliser doivent avoir la composition suivante :

	n° 1	n° 2
Bioxyde de manganèse (MnO_2) . .	40 %	—
Bioxyde de cuivre (CuO_2)	—	30 %
Carbonate de soude sec	30 %	40 %
Sable blanc siliceux sec	30 %	30 %
Quantité utilisée (en pourcentage de la masse de métal)	4 %	2 %

Le premier flux est chargé avec le métal ; dès que le bain est formé et décrassé, le deuxième flux est chargé sur le bain.

Deuxième cas : charge constituée de lingots d'affinerie et de déchets au titre. — Les flux à utiliser doivent avoir la composition suivante :

Pourcentage de zinc de la charge	moins de 5 %	plus de 5 %
Sable siliceux ($Si\ O_2$) . . .	30 %	Charbon de bois bien sec et 0,5 % de chlorure de sodium
Spath-fluor ($Ca\ F_2$)	30 %	
Carbonate de soude ($Na_2\ CO_3$)	30 %	
Sel marin sec ($Na\ Cl$)	10 %	
Quantité utilisée : 2 à 3 % de la masse de métal.		

Lorsque la charge est complètement fondue, il faut écumer soigneusement puis ajouter du charbon de bois bien sec. Lorsque la température est suffisante pour la coulée, il faut désoxyder par addition de 0,5 % de zinc dans le creuset puis de 0,15 % de phosphure de cuivre à 15 % de phosphore.

Si la coulée est effectuée à l'aide d'une petite poche à main, le phosphure de cuivre est placé au fond de la poche préalablement chauffée au rouge vif ; le prélèvement du métal entraîne un brassage efficace. Après un contact minimal de 30 secondes, il faut procéder à la coulée en retenant les crasses à l'aide d'un crémoir.

Différents bronzes spéciaux

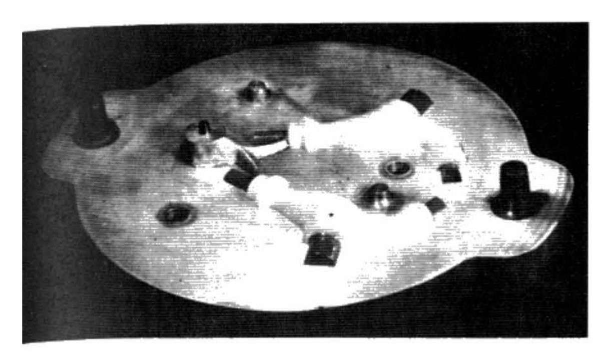
1° *Bronzes phosphoreux.* — Ces bronzes sont élaborés en partant d'alliages de bonne qualité ou de métaux purs. Leur teneur en phosphore est généralement comprise entre 0,15 et 0,30 % mais elle peut atteindre 0,50 % pour des applications particulières. La composition normalisée est (pour U-E12 P) : Cu $>$ 83,5 % ; 10,5 % $<$ Sn $<$ 12,5 % ; Zn $>$ 2 % ; Pb $<$ 1 % ; P $>$ 0,10 % ; ΣME (métaux étrangers) : 1,5 %. Les caractéristiques mécaniques correspondantes sont :

$$R_t = 20\ daN/mm^2\ ;\ A = 4\ \%\ \text{et}\ H_B = 80\ daN/mm^2$$

2° *Bronzes au plomb* (norme NF A 53-751). — La difficulté de la fabrication de pièces en bronze au plomb à teneur élevée (5 à 30 %) résulte de la non miscibilité du cuivre et du plomb, qui se séparent totalement au cours du refroidissement, par différence de densité. Le maintien d'une répartition homogène du plomb dans l'alliage pendant le refroidissement est favorisé par la présence d'un peu d'étain ainsi que d'une faible proportion de nickel ($\approx$ 1 %). Le refroidissement doit être aussi rapide que possible. Comme dans le cas des cuivres au plomb, la température de l'alliage est poussée à 1 200 ou 1 300 °C afin d'obtenir la solubilisation du plomb dans le cuivre.

Lorsque la charge est constituée de métaux purs, le cuivre et l'étain sont d'abord alliés avec les précautions indiquées dans la méthode générale puis, après écumage et désoxydation au phosphure de cuivre, le bain est recouvert de charbon de bois sec. Le plomb est ajouté avec précaution et par petites quantités. Le bain est brassé énergiquement à l'aide d'un agitateur en plombagine et le chauffage du four est accéléré afin d'atteindre la température indiquée. Après écumage soigné, on désoxyde au phosphure de cuivre (0,10 % environ) et on coule en brassant sans interruption jusqu'au moment du remplissage des moules.

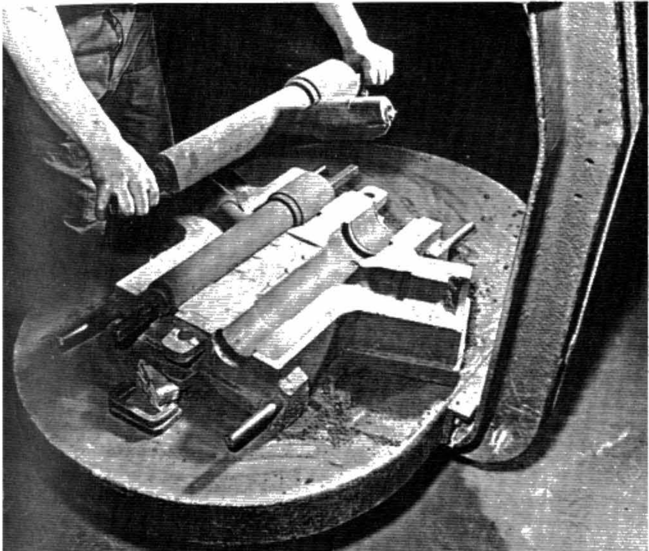
Lorsque la charge comporte une forte proportion de déchets ou de lingots de bronze au plomb, le cuivre et l'étain ou le cupro-étain sont fondus en présence d'un flux (2 % environ de la masse de la charge) composé de 20 % de carbonate de soude sec, 20 % de carbonate de chaux sec et 60 % de sable blanc siliceux. Dès que le bain est formé, on introduit les lingots et les déchets avec du charbon de bois sec et le couvercle est placé sur le creuset. Lorsque la température du bain atteint 1 200 °C, on désoxyde par addition de 0,5 % de zinc et 0,10 % de phosphure de cuivre. Le chauffage est accéléré ; le bain, parfaitement décrassé, est recouvert de charbon de bois et on procède à la coulée.



Modèle utilisé pour la réalisation d'un robinet; on applique fortement le sable pour obtenir directement son empreinte

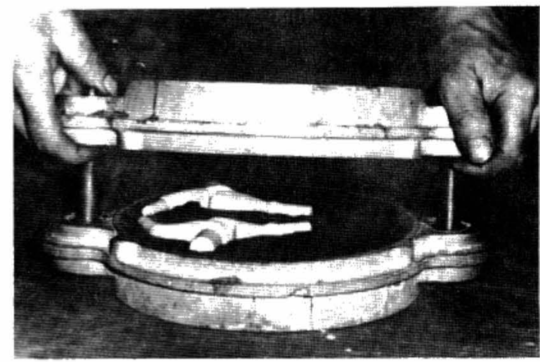


Moule: deux châssis contenant le sable serré contre le modèle

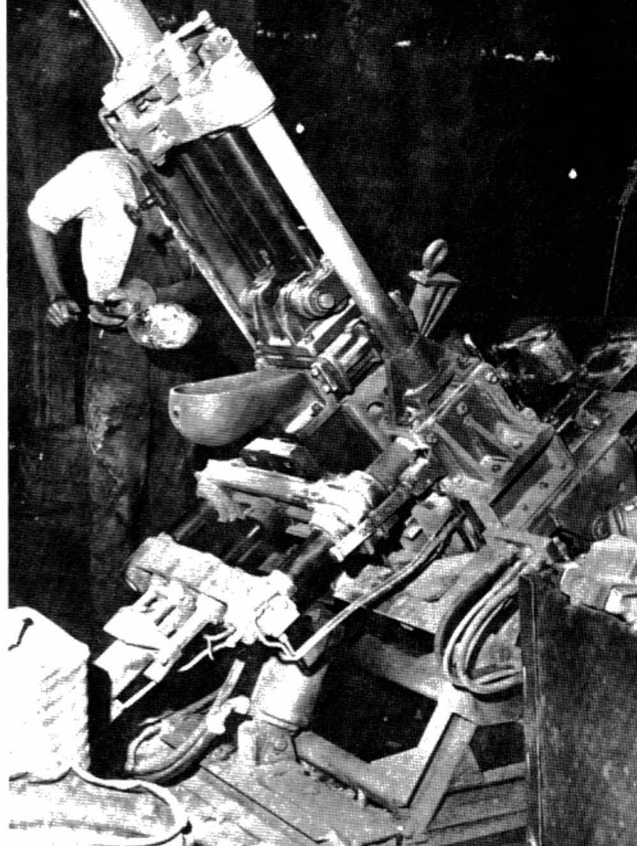


Insertion des noyaux dans un moule pour embranchements de tuyaux

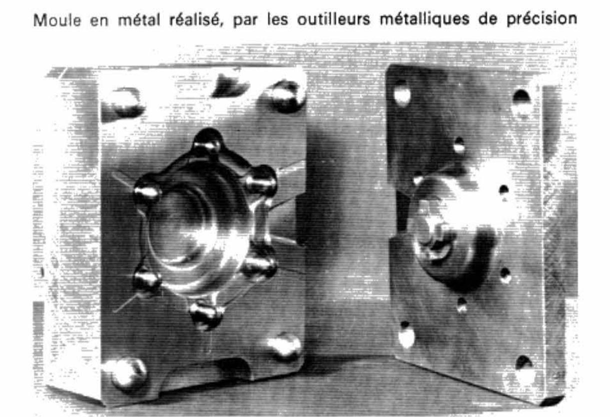
Fermeture du moule: la partie supérieure, avec ses canaux de coulée, est descendue sur la partie contenant le noyau (forme intérieure de la pièce)



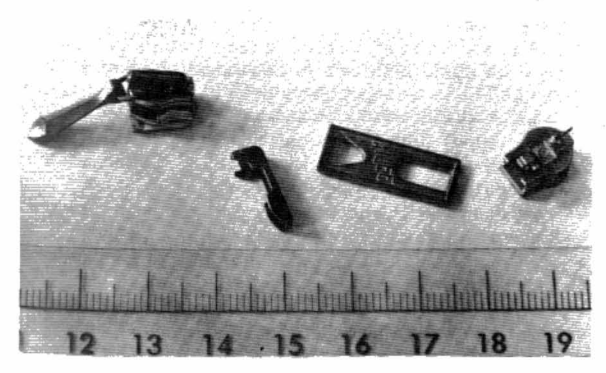
Le métal liquide contenu dans la poche est déversé par l'entonnoir dans la machine à coquiller qui va se redresser progressivement



Moule en métal réalisé, par les outilleurs métalliques de précision



Pièces pour fermeture à glissière en alliages de zinc moulés sous pression



Photos: Syndicat général des fondeurs de France

Différentes sortes de bronzes courants (NF A 53-707)

Exemples	Cuivre (pourcentage)	Étain (pourcentage)	Zinc (pourcentage)	Plomb (pourcentage)	ΣME	Détail	Résistance à la traction (R_r) en décanewtons par millimètre carré	Allongement A (pourcentage)	Utilisations
U-E 5 Pb Z	> 83,0	> 4,5	3-7	3-7	1,3	Fe < 0,4 ; Sb < 0,4 Mn, As < 0,2 S < 0,1 ; Al < 0,02	—	—	petites pièces de décoration
U-E 5 Pb 5 Z 5	> 84,0	4-6	4-6	4-6	1,0	Fe < 0,3 ; Sb < 0,5 Mn S < 0,2 ; S < 0,10 Al < 0,02	20	10	robinetterie petits coussinets
U-E 7 Z 5 Pb 4	> 82,0	6,5-8	4-7	3-4,8	1,0	id.	21	10	id.
U-E 8 Z 2	> 86,0	7-10	1-4	< 2	3,0	id. S < 0,05	22	16	mat. S.N.C.F.
U-E 10 Z 1	> 85,5	8,5-10,5	< 2	< 2	2 y compris Pb	id.	25	13	robinetterie sous pression
U-E 12 Z 1	> 83,5	10,5-12,5	< 2	< 1,5	id.	Fe < 0,2 ; Sb < 0,3 Mn < 0,1 ; Al < 0,02 S < 0,05 ; As < 0,2	23	7	80 pièces frottantes (H_B = 80)
U-E 14	> 83,5	12,5-14,5	< 1	< 1	2	id.	—	—	frottements sans choc (H_B = 100)
U-E 16	> 81,0	14,5-17,0	< 1	< 1	2	id.	—	—	résistance à l'écrasement
U-E 18	> 80,0	17,0-19,0	< 0 5	< 1	1	id.	—	—	grande dureté segments

La température de coulée doit être aussi basse que possible, en rapport avec l'épaisseur des pièces : de 1 020 à 1 100 °C. Afin de conserver l'homogénéité de l'alliage, les pièces sont refroidies aussi rapidement que possible : soit en coquilles, soit par circulation d'eau, soit en pratiquant des puits dans les moules, entre les pièces et en remplissant ces puits d'eau, après la coulée.

3° *Bronze au nickel.* — Les bronzes au nickel présentent des caractéristiques mécaniques très bonnes, susceptibles d'être encore améliorées par un traitement thermique adéquat. Ces bronzes doivent être élaborés avec des matières premières de qualité. La teneur en nickel est comprise entre 3 et 6 %. La composition de base est : cuivre 88 %, nickel 5 %, étain 5 %, zinc 2 %. La fusion est conduite selon la méthode générale et on utilise le flux numéro 1 ; les déchets, le cupro-nickels et le cuivre pur, s'il y en a, sont enfournés les premiers. Dès que le bain liquide est obtenu, on brasse énergiquement et, après écumage, le zinc est ajouté. La désoxydation finale est réalisée selon la méthode générale et les moules sont coulés à une température comprise entre 1 120 et 1 200 °C, compte tenu de l'épaisseur des pièces.

5.3.4. Les laitons (norme NF A 53-703). — Les laitons contiennent de 55 à 95 % de cuivre et des éléments d'addition tels que : aluminium, fer, nickel, manganèse, étain et plomb, le complément étant le zinc.

On distingue les laitons ordinaires courants, les laitons complexes et les laitons à haute résistance (H.R.).

Remarque importante : Les règles générales relatives à l'élaboration des alliages cuivreux par *oxydation-réduction* (V. § 5.3.1), ne sont pas nécessaires dans la préparation des laitons. En effet, le zinc, dont le point de fusion est de 419 °C, a une température d'ébullition de 907 °C, alors que la température de début de fusion du laiton, dans les compositions indiquées, est de 902 °C. Les vapeurs de zinc entraînent les gaz dissous (hydrogène ou oxyde de carbone) dont la solubilité se trouve très réduite par la présence d'une forte proportion de zinc dans l'alliage. Ainsi, les laitons ne présentent pas le phénomène de *rochage* rencontré dans les cuivres et les bronzes.

1° *Laitons ordinaires.* — Dans ces laitons la teneur des éléments autres que le cuivre et le zinc est faible. Leur structure est presque entièrement occupée par la phase α. Les mitrailles (soigneusement triées afin d'éliminer les alliages d'aluminium, de fer, de plomb, etc.), séchées et dégraissées, sont chargées dans le creuset chauffé au rouge vif, puis les lingots de cuivre et les lingots au titre sont ajoutés. Les charges sont recouvertes de charbon de bois sec et de sel marin (0,5 % environ), préalablement séché. La chauffe est poussée rapidement et, au fur et à mesure de la fusion, les lingots sont introduits dans le creuset. Dès que la fusion est terminée, les vapeurs de zinc apparaissent ; le bain est écumé, le zinc complémentaire est ajouté. Le charbon de bois et le sel marin sont à nouveau jetés sur le bain dont le chauffage est repris jusqu'à ébullition franche du zinc. L'écumage soigné du bain étant terminé, on abaisse la température en ajoutant un lingot au titre, exempt de toute souillure. Le bain est désoxydé avant la coulée, par addition dans le creuset de 0,07 % de phosphure de cuivre, pour les laitons dont la teneur en cuivre est supérieure à 80 %. Pour les laitons dont la teneur en cuivre est inférieure à 80 %, cette désoxydation n'est pas nécessaire.

Le bain est à nouveau brassé, recouvert de charbon de bois et de sel marin et, lorsque la température est atteinte, l'alliage est coulé rapidement. Le tableau suivant indique les températures à respecter.

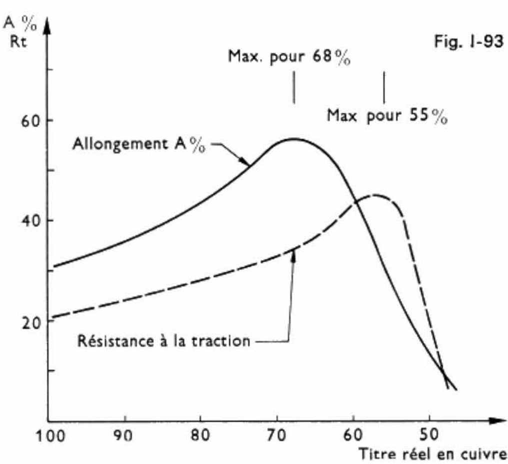
Teneur en cuivre (pourcentage)	Pièces d'épaisseur < 10 mm	Pièces d'épaisseur > 10 mm
80	1 250 °C	1 150 °C
70	1 150 °C	1 080 °C
67	1 100 °C	1 030 °C
63	1 050 °C	980 °C

2° *Laitons complexes.* — Cette catégorie comprend les laitons auxquels des éléments complémentaires sont ajoutés afin d'obtenir des propriétés particulières :

— laitons à l'étain, dont la résistance à la corrosion par l'eau de mer est nettement améliorée ;
— laitons au plomb, dont l'usinabilité est améliorée ;
— laitons au plomb et à l'étain : 1 % < Pb < 4 % et 0,75 % < Sn < 2 % ;
— laitons au nickel entrant dans la catégorie des *maillechorts*.

Les règles précédentes, recommandées pour l'élaboration des laitons ordinaires, sont applicables : on ajoute l'étain sous forme de cupro-étain (à 67 % d'étain), le plomb sous forme de cupro-plomb ou de plomb pur, avant l'addition finale de zinc.

3° *Laitons à haute résistance.* — Les caractéristiques mécaniques optimales d'un laiton binaire sont obtenues, lorsque la structure comporte deux phases déterminées dites α et β, pour des teneurs en cuivre comprises entre 53 et 63 % (fig. I-93). La coulabilité est optimale pour 61 % de cuivre.



Caractéristiques mécaniques du laiton à haute résistance

Divers éléments d'addition sont alliés à un laiton de base ; certains ont la propriété de favoriser la formation de la phase α (alphagènes), d'autres, au contraire, favorisent la formation de la phase β (bêtagènes). On compare ces divers éléments en fonction de leur coefficient d'équivalence k en zinc.

a) $k < 1$: ces éléments ont tendance à déplacer le diagramme d'équilibre vers la droite du graphique.

Exemples : silicium ($k = 10$), aluminium ($k = 6$), étain ($k = 2$), magnésium ($k = 2$).

b) $k = 1$: ces éléments ne modifient pas le diagramme d'équilibre ; Exemple : le plomb

c) $k < 1$: ces éléments déplacent le diagramme d'équilibre vers la gauche du graphique.

Exemples : fer ($k = 0{,}9$), manganèse ($k = 0{,}5$), nickel ($k = -1{,}3$)

Titre réel et titre fictif.

• Titre réel : Le titre réel d'un laiton est donné par la teneur en cuivre ce que l'on écrira symboliquement :

$$T_r = \frac{\% \text{ Cu}}{\% \text{ Cu} + \% \text{ Zn} + \% \text{ Insolubles} + \Sigma \% \text{ Solubles}}$$

• Titre fictif : Le titre fictif d'un laiton est le titre d'un laiton binaire qui présenterait la même structure micrographique que le laiton complexe considéré (mêmes pourcentages de phases α et β). Ce titre fictif est donné par la relation :

$$T_f = \frac{\% \text{ Cu}}{\% \text{ Cu} + \% \text{ Zn} + \% \text{ Insolubles} + \Sigma k \times \% \text{ Solubles}}$$

Exemple n° 1 : soit un laiton de composition :

Cu	Zn	Al	Fe	Mn
67 %	22 %	5 %	3 %	3 %

son titre réel est :

$$T_r = \frac{67}{67 + 22 + 5 + 3 + 3} = 67$$

son titre fictif est :

$$T_f = \frac{67}{67 + 22 + 6 \times 5 + 0{,}9 \times 3 + 0{,}5 \times 3} = \frac{67}{123{,}2} = 54{,}3$$

Influence des éléments d'addition :

• Aluminium : il élève la résistance à la traction R_t et la limite d'élasticité E, améliore la résistance à l'oxydation par formation d'une pellicule d'alumine imperméable, réduit la perte de zinc par évaporation, augmente la résistance à la corrosion.

• Étain : il élève R_t et E et améliore la résistance à la corrosion, surtout par l'eau de mer.

• Fer : il affine le grain et augmente R_t et E ; il doit être ajouté conjointement au manganèse.

• Manganèse : il accompagne le fer, augmente R_t, E et A ; il sert de désoxydant.

• Plomb : il est insoluble dans le cuivre ; pour des teneurs comprises entre 0,1 et 0,5 % il améliore l'usinabilité s'il est bien réparti dans la structure.

5.3.5. Les cupro-nickels (norme NF A 53-705). — Dans cette étude, les alliages cuivre-nickel sont étudiés dans leur ensemble, en même temps que les cupro-nickels dont la teneur en cuivre est supérieure à 50 %.

1° *Généralités.* — La métallurgie de ces alliages est marquée, d'une part, par les précautions à prendre pour la fusion du cuivre (déjà vues) et, d'autre part, par trois particularités dues à l'affinité du nickel pour trois corps :

a) éviter le contact de nickel avec le gaz sulfureux SO_2 ou l'hydrogène sulfuré H_2S ;

b) éviter le contact du nickel avec la silice SiO_2 ou les silicates ;

c) éviter le contact du nickel avec le carbone.

En conséquence si l'élaboration de l'alliage est pratiquée au creuset de graphite, il faut le brasquer à l'aide de kaolin ($\frac{1}{3}$ de kaolin cru et $\frac{2}{3}$ de kaolin cuit) puis le sécher et le porter au rouge cerise (la couche doit atteindre au minimum 5 mm et être obtenue par plusieurs brasquages suivis de séchage). Si la fusion a lieu au four électrique, le revêtement réfractaire doit être alumineux : sillimanite, mullite ou corindinite.

2° *Différents alliages cuivre-nickel*

— cuivre-nickel avec plus de 50 % de nickel ;
— cupro-nickel à teneur moyenne en nickel comprise entre 10 et 30 % ;
— cupro-nickels complexes : teneur en nickel comprise entre 10 et 30 %, teneur en zinc comprise entre 5 et 15 % ;
— maillechorts : teneur en nickel comprise entre 6 et 30 %, teneur en zinc comprise entre 10 et 30 %.

a) *Cuivre-nickel* (Ni > 50 %). — La fusion est réalisée au four à induction à haute fréquence ou au four à creuset, soigneusement brasqué au kaolin (on utilise de préférence des creusets à chauffe rapide).

• *Métal monel :* Cet alliage est, actuellement, élaboré synthétiquement au four électrique à induction sous pression réduite afin d'éviter la dissolution des gaz.

Le monel S convient pour les pièces moulées (sa dureté, 180 hbar, atteint 350 hbar après traitement thermique). Le monel K est susceptible d'atteindre une dureté de 400 hbar par durcissement structural ($R_t = 150$ à 175 daN/mm²; $E = 100$ à 120 daN/mm²). Le monel R a une usinabilité améliorée grâce à une teneur un peu plus élevée en soufre (0,035 %) qui provoque la rupture du copeau.

• *Cuivre-nickel autre que le monel :* on ajoute quelquefois du silicium ou de l'aluminium, toujours avec 1 % de manganèse, le silicium sous forme de cuivre-silicium, l'aluminium sous forme de cuivre-aluminium (33-67) et le manganèse à l'état pur.

Élaboration : le creuset est porté au rouge vif, les déchets au titre sont placés au fond du creuset sur une hauteur

Désignation	Nickel %	Cuivre %	Fer %	Aluminium %	Silicium %	Manganèse %	Carbone %	Soufre %	R_t	R_e	A %
Monel courant	67,0	30,0	1,4	—	0,10	1,0	0,15	0,005	45 à 65	20 à 30	30 à 45
Monel *S*	63,0	30,0	2,0	—	4,0	0,9	0,1	0,005			
Monel *K*	66,0	29,0	0,9	2,75	0,25	0,40	0,15	0,005			
Monel *R*	67,0	30,0	1,7	—	0,05	1,1	0,10	0,035			

R_t : résistance à la rupture par extension. R_e : limite élastique

de 4 à 5 cm (à défaut de déchets on utilise du cuivre pur) puis on introduit tout le nickel. Sur les charges, on ajoute un flux dont la composition est la suivante (2 % de la masse de la charge) :

— bioxyde de manganèse : 30 % ;
— bioxyde de cuivre : 30 % ;
— carbonate de soude : 20 % ;
— sable blanc siliceux : 20 %.

Les éléments sont enfournés petit à petit pour éviter de geler le bain. Dès que tout est fondu, on brasse énergiquement avec un agitateur brasqué au kaolin et parfaitement séché ; on écume soigneusement en épaississant le laitier avec du sable blanc bien sec. Avant la coulée, on désoxyde avec 0,12 % de magnésium sous forme de fil, fixé à l'extrémité d'un ringard en nickel enfoncé rapidement dans le bain.

La coulée est faite aussitôt après, un tampon d'étoupe étant placé devant le bec du creuset de façon à créer une atmosphère réductrice et à retenir les crasses.

La température de coulée doit être comprise entre 1 400 et 1 500 °C suivant les moulages.

b) *Cupro-nickel à teneur moyenne.* — 50 à 70 % de déchets au titre, parfaitement propres, sont chargés dans un creuset porté au rouge vif, recouverts de 2 % du flux précédent. Lorsque le bain est formé, on complète la charge en brassant énergiquement, puis on ajoute 0,2 % de manganèse pur. On recouvre de charbon de bois en ignition et on réchauffe pendant 10 mn de façon à atteindre 1 350 à 1 400 °C, suivant les pièces à couler. On écume soigneusement, on désoxyde avec 0,03 à 0,05 % de magnésium, puis on opère comme précédemment.

c) *Cupro-nickels complexes.* — Ils renferment quelquefois du plomb et du zinc pour améliorer l'usinabilité. On ajoute du silicium et du manganèse afin d'améliorer la résistance à la corrosion.

Élaboration : on charge 50 à 70 % de déchets au titre et on complète par des alliages mères (cupro-nickel : 50/50 ou 70/30, cupro-étain : 50/50 ou 40/60, cupro-plomb : 30/70 ; zinc sous forme de laiton) dans un creuset à chauffe rapide chauffé au rouge vif (fusion oxydante). On charge ensuite l'alliage cupro-nickel puis le cuivre pur. On brasse énergiquement, on écume et on recouvre de charbon de bois en ignition ; on désoxyde avec 0,06 % de magnésium comme précédemment.

d) *Maillechorts.* — Mis au point par deux ouvriers lyonnais Maillet et Chorier (d'où le nom) vers le début du XIX[e] siècle, ils se composent de 55 % à 67 % de cuivre, 5 % à 25 % de nickel et de zinc. On fond d'abord 60 à 70 % de déchets secs et dégraissés, puis le cupro-nickel est dilué progressivement. Il se produit une perte d'environ 1,5 % de zinc. On recouvre le bain avec le même flux que précédemment (2 % de la masse de la charge). Après avoir écumé le bain on ajoute 0,2 % de manganèse pur et on recouvre de chlorure de sodium sec. La coulée est faite dès que la température est suffisante.

5.3.6. Les cupro-aluminiums (norme NF A 53-709). — La composition des cupro-aluminiums est assez complexe. L'alliage de base est constitué par 80 à 90 % de cuivre ; la teneur en aluminium est généralement comprise entre 9 et 11 %. Des éléments comme le fer et le nickel sont ajoutés pour améliorer les caractéristiques mécaniques ou la résistance à la corrosion.

Influence des divers éléments d'addition :

— *Fer :* le fer améliore la structure, augmente les caractéristiques mécaniques, surtout la résilience sans diminuer la bonne malléabilité à chaud. Il améliore la résistance à la corrosion par l'acide acétique et l'acide sulfurique. Sa teneur peut varier entre 1 et 7 % (pratiquement elle est de 2 à 3 %). Il est ajouté sous forme d'alliage mère (Cu : 50 %, Fe : 25 %, Al : 25 %).

— *Nickel :* entre 0,3 et 0,5 %, le nickel affine la structure et il améliore aussi la résistance à la pression ; entre 4 et 7 %, il augmente la résistance à la rupture par traction et la dureté. Il augmente la résistance à la corrosion par l'eau de mer et il réduit la coulabilité. Le fer et le nickel sont ajoutés ensemble. Le nickel est introduit sous forme de cupro-nickel 70/30.

— *Manganèse :* il joue le rôle de désoxydant pour les faibles teneurs ; de plus, il fixe le soufre et le silicium et ainsi supprime les points durs. Il peut être ajouté dans une proportion comprise entre 1 et 2 % pour améliorer la résistance à la traction, la limite élastique et la dureté Brinell, mais l'allongement à la rupture diminue fortement.

— *Magnésium :* jusqu'à 0,5 %, le magnésium améliore la résistance à la corrosion ; jusqu'à 0,07 %, il joue le rôle de désulfurant. Il est toujours ajouté avec du manganèse ; il donne aux pièces une couleur voisine de celle de l'or pour la bijouterie de fantaisie. L'addition se fait sous cloche, avec précaution.

— *Plomb :* entre 0,5 et 1 %, le plomb est ajouté pour améliorer l'usinabilité sans affecter les caractéristiques mécaniques. Pour améliorer les conditions de frottement, la teneur est comprise entre 2 et 5 %. Il est ajouté avec du manganèse et de l'étain, qui favorisent sa distribution homogène dans la structure.

— *Les autres éléments sont considérés comme indésirables,* ou comme des impuretés. Cependant, certains sont ajoutés afin d'améliorer certaines propriétés sans que les autres soient affectées :

• *Silicium :* On en ajoute volontairement, 1,5 à 2 %, lorsque la teneur en nickel est voisine de 4,5 % et celle de l'aluminium de 7 %. Il améliore la coulabilité ainsi que la résistance à la corrosion. À partir de 0,2 % il provoque la formation de criques, de même que le bismuth et le zinc.

Il affecte la résilience et la ductilité de l'alliage et donne une couleur grisâtre à la peau des pièces. Il est à prohiber formellement si l'alliage contient du plomb.

• *Étain :* il est ajouté aux cupro-aluminiums à des teneurs inférieures à 0,5 % afin d'augmenter la résistance à la corrosion par l'eau de mer. Il diminue très sensiblement l'allongement et doit être considéré comme indésirable pour toutes les autres applications.

• *Phosphore :* les phosphures se déposent aux joints des grains et rendent l'alliage fragile, surtout à chaud, aussi le phosphore diminue-t-il la résilience et la ductilité. Il est ajouté volontairement (0,10 %) dans les alliages devant résister à la corrosion (cuivre : 83 à 85 %, aluminium : 9 à 10 %, fer : 4 à 5 %, plomb : 0,5 %). L'addition est faite sous forme de phosphure de cuivre à 15 % de phosphore.

• *Soufre :* c'est une impureté toujours nuisible car à partir de 0,05 % de soufre l'alliage devient poreux.

Exemple de charge : pour obtenir 100 kg d'un cupro-aluminium de composition $\frac{\text{Cu}}{84}, \frac{\text{Al}}{9}, \frac{\text{Fe}}{4}, \frac{\text{Ni}}{3}$, il faut :

Cuivre de cathode : 66,530 kg
Cupro-aluminium 33/66 : 5,970 kg

Cupro-nickel 70/30 : 10,000 kg
Cupro-aluminium-fer 50/25/25 : 16,000 kg
Aluminium pur : 1,300 kg
Manganèse pur : 0,200 kg

5.4. L'aluminium et ses alliages. — L'aluminium a été découvert par l'Allemand Woehler en 1827 (par réaction à chaud du potassium sur le chlorure d'aluminium). Mais le premier lingot d'aluminium fut présenté à l'Académie des sciences à Paris le 20 mars 1854 par Henri Sainte-Claire Deville : il avait remplacé le potassium par le sodium et obtenu (par réaction du sodium au rouge sur le chlorure d'aluminium) l'aluminium en lingot ; il en avait donné les propriétés remarquables.

La métallurgie de l'aluminium s'est développée par la méthode de Sainte-Claire Deville jusqu'à l'invention du four électrique par Héroult, en 1886. Actuellement, la totalité de l'aluminium mondial est obtenu par électrolyse ignée d'alumine purifiée.

5.4.1. Propriétés de l'aluminium

1° *Mécaniques.* — (Pour de l'aluminium à 99,5 % de pureté et sur un barreau de 30 mm de diamètre) :

	Coulé en sable	Coulé en coquille
R_t	9 daN/mm²	10 à 11 daN/mm²
R_e	4 daN/mm²	6 daN/mm²
A	10 à 20 %	15 à 25 %
Dureté Brinell	24 à 32 daN/mm²	
Module d'élasticité	6 800 daN/mm²	

2° *Chimiques.* — L'aluminium s'oxyde très facilement suivant la réaction :

$$4\,Al + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Al_2O_3$$

À la température ordinaire, il se forme un film d'alumine très mince, imperméable et très adhérent sur les objets en aluminium ; ce film s'oppose au passage de l'oxygène et protège du cheminement de la corrosion vers l'intérieur. Ce film donne à l'aluminium une bonne résistance à la corrosion : l'aluminium pur résiste bien à la corrosion par les graisses, les huiles, les hydrocarbures, l'alcool absolu, l'acide nitrique, l'acide sulfhydrique, le gaz carbonique, le formol et l'ammoniac.

Toutefois, l'aluminium est attaqué par l'acide chlorhydrique, l'acide fluorhydrique, la soude, la potasse, le carbonate de soude, le carbonate de potassium et le mercure.

3° *Métallurgiques.* — Il faut fournir plus d'énergie pour fondre 1 kg d'aluminium à 660 °C (10^6 J/kg) que pour fondre 1 kg de fer à 1 535 °C ($0{,}91 . 10^6$ J/kg), de sorte que les fours de fusion pour l'aluminium et ses alliages doivent avoir une puissance de chauffe très élevée, d'autant que la fusion doit être conduite le plus rapidement possible.

L'aluminium dissout l'hydrogène atomique (rayon atomique : $53 . 10^{-6}$ µm) qui provient de la vapeur d'eau ou d'hydrocarbures et avec lequel il forme un véritable alliage d'insertion. Au cours du refroidissement, l'hydrogène se dégage et provoque la formation de soufflures endogènes qui prennent le nom de *piqûres* (*rochage* dans les alliages cuivreux). Le retrait de l'aluminium est de 1,7 % environ.

5.4.2. Alliages d'aluminium. — L'aluminium pur est peu utilisé en fonderie.

Les éléments les plus couramment alliés à l'aluminium sont :

— *Le silicium :* déjà présent dans le minerai, le silicium (température de fusion : 1 410 °C ; masse volumique : 2,33 g/cm³) améliore progressivement et simultanément la coulabilité et les caractéristiques mécaniques de l'alliage jusqu'à la teneur eutectique de 11,7 % à 577 °C. Il affecte la conductivilité thermique et réduit le retrait, diminuant ainsi le risque de criques et de retassures. Au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en silicium, des grains de silicium apparaissent dans la structure et les difficultés d'usinage augmentent : un traitement au sodium, inventé par Aladar Pacz (d'où le nom d'Alpax de l'alliage eutectique) permet d'affiner le grain et d'éviter les difficultés d'usinage. Au-dessus de 13 % de silicium, l'affinage est obtenu par addition de titane, de bore ou de zirconium. Las alliages les plus utilisés sont les alpax (silicium : 11 à 13 %) et les hypersiliciés (silicium : 18 à 24 %), employés pour la fabrication des pistons d'automobile ou de camion car la forte teneur en silicium diminue la masse volumique (donc l'inertie de la pièce).

La résistance à la corrosion des alliages aluminium-silicium est bonne.

— *Le cuivre :* il augmente la résistance mécanique et la dureté de l'alliage jusqu'à 12 % environ ; au-dessus, l'alliage devient fragile. La masse volumique de l'alliage croît avec la teneur en cuivre. La conductibilité thermique est améliorée par la présence du cuivre mais la résistance à la corrosion diminue. Il se forme un composé défini Al_2Cu qui augmente la rigidité des pièces. Pour le formage, il faut faire subir un traitement de mise en solution de ce composé, suivi d'une trempe. Un traitement de maturation (ou de vieillissement) accélère la précipitation de ce composé, ce qui a pour effet d'accroître la dureté : ce phénomène prend le nom de *durcissement structural.* Cette précipitation s'accompagne d'une augmentation de volume dont il faut tenir compte lorsque l'alliage est utilisé pour la fabrication de pistons de moteurs. C'est l'Allemand Alfred Wilm qui a mis au point le traitement de l'alliage aluminium-cuivre, à Düren, d'où son nom *duralumin.*

— *Le magnésium :* l'addition de magnésium, jusqu'à une teneur de 6 %, augmente graduellement la dureté de l'alliage. Les alliages aluminium-magnésium ont une bonne résistance à la corrosion, de bonnes caractéristiques mécaniques et une excellente usinabilité. Toutefois, leur coulabilité est moins bonne que celle des autres alliages d'aluminium et ils ont tendance à former plus de crasse. Leur faible intervalle de solidification nécessite une attention spéciale pour la coulée et l'alimentation des parties massives. Ils sont susceptibles d'oxydation anodique.

Lorsque le magnésium est ajouté conjointement avec du silicium, il se forme un composé défini Mg_2Si qui se comporte comme le composé précédent Al_2Cu : il augmente la dureté et les caractéristiques mécaniques de l'alliage mais réduit sa malléabilité. Cet alliage peut faire l'objet d'un traitement thermique.

— *Le zinc :* après avoir été l'un des premiers éléments d'addition à l'aluminium, le zinc a été abandonné au profit d'autres éléments tels que le silicium, le cuivre et le magnésium. Mais depuis une quinzaine d'années, les études des alliages aluminium-zinc ont abouti à un alliage désigné par le symbole A-Z 5 G. Ses qualités de résistance aux chocs et aux déformations, ainsi que ses caractéristiques mécaniques l'ont fait adopter pour la fabrication de pièces de suspension et des étriers de freins à disques de voitures. Un court vieillissement naturel lui confère des propriétés proches des alliages à traitement thermique ($R_t \approx 58$ daN/mm² ; $R_e \approx 50$ daN/mm²).

— *Le fer :* il est considéré comme une impureté ; comme le silicium il provient du minerai (la bauxite contient plus de 20 % de sesqui-oxyde de fer Fe_2O_3 et 3 à 4 % de silice SiO_2). Avec l'aluminium il forme un composé défini Al_3Fe qui précipite aux joints des grains et rend l'alliage fragile ; aussi, la teneur en fer des alliages légers ne doit-elle jamais excéder 1,2 %. L'addition de manganèse a pour effet de former un constituant ternaire (Mn, Fe) Al_6 qui précipite sous forme sphéroïdale, sans conséquence fâcheuse pour la résistance de l'alliage. Le total de la teneur en fer ajoutée au double de la teneur en manganèse et au triple de la teneur en chrome ne doit en aucun cas, excéder 1,9 % afin d'éviter la formation exagérée de crasse, de points durs pour l'usinage et de criques pendant l'utilisation des pièces.

Dans les alliages au silicium, le fer, le silicium et l'aluminium forment un composé ternaire (Al, Fe, Si) qui précipite ; le risque de criques augmente lorsque la teneur en fer dépasse 1 %.

— *Le manganèse :* il est ajouté aux alliages légers pour neutraliser l'effet fragilisant du fer ; il augmente la tenue à la corrosion des duralumins. Par suite de la température élevée de l'eutectique aluminium-manganèse (654 °C), cet alliage est utilisé pour la fabrication des brûleurs pour fourneaux à gaz car il conserve de bonnes caractéristiques mécaniques à des températures voisines de celle de fusion.

— *Le nickel :* il est ajouté dans les alliages complexes pour améliorer les caractéristiques mécaniques, surtout à chaud. Néanmoins, ces additions se limitent à 2 %.

— *Le titane :* l'addition de titane a pour effet d'affiner le grain. L'addition doit être effectuée de préférence peu de temps avant la coulée. Comme le fer, le cuivre et le nickel, il forme des constituants durs qui améliorent la résistance à l'usure par frottement.

Principaux alliages légers courants utilisés pour la coulée en sable, en coquille ou sous pression : le résumé suivant de la norme NF A 02-001, relative à la désignation des alliages d'aluminium, en facilitera la lecture.

A : désigne l'aluminium,
A1 : aluminium de première fusion (lingots),
A2 : aluminium de deuxième fusion (fonderie),
Y : métal moulé,
Y0 : non défini,
Y1 : lingot,
Moulage { Y2 (sable), Y3 (coquille), Y4 (sous pression), Y5 (par concréfaction).

Traitement thermique

Aucun traitement thermique ou non spécifié = 0
Recuit . . . . = 1
Trempé . . . . = 2
Trempé et revenu . . . . = 3
Trempé et mûri . . . . = 4
Stabilisé . . . . = 5

Symbolisation de l'élément principal et des éléments d'addition

Aluminium :	A	Fer :	Fe
Antimoine :	R	Magnésium :	G
Béryllium :	Be	Manganèse :	M
Bismuth :	Bi	Nickel :	N
Bore :	B	Plomb :	Pb
Cadmium :	Cd	Silicium :	S
Cérium :	Ce	Titane :	T
Chrome :	C	Tungstène :	W
Cobalt :	K	Vanadium :	V
Cuivre :	U	Zinc :	Z
Étain :	E	Zirconium :	Zr

Exemple : un alliage d'aluminium contenant 5 % de cuivre, du manganèse et du titane, est désigné par : A-U5-MT.

L'alpax à 13 % de silicium : A-S13.

A99 : aluminium pur à 99,99 % ;
A95 : aluminium pur à 99,95 % ;
A8 : aluminium pur à 99,8 % ;
A7 : aluminium pur à 99,7 % ;
A5 : aluminium pur à 99,5 % ;
A4 : aluminium pur à 99 %.

5.4.3. Fusion des alliages d'aluminium. — La quantité de chaleur à fournir pour fondre les alliages d'aluminium étant très grande il faut donc des fours équipés de brûleurs ou de sources de chaleur puissants.

Règles générales de la fusion : la fusion doit être conduite rapidement afin de réduire au minimum les altérations du métal et pour éviter la dissolution des gaz ; il faut sécher et préchauffer tous les outils utilisés au cours de la fusion pour éliminer toute trace d'humidité qui pourrait être génératrice d'hydrogène.

1° *Appareils de fusion.* — L'aluminium dissout le fer ; aussi est-il préférable d'éviter les creusets en fonte.

a) *Fours à creusets en réfractaire* (fig. I-94) : la surface de contact métal-gaz est réduite. Ils sont utilisés pour les alliages délicats. Le creuset doit être porté au rouge avant l'introduction de la charge. On charge les petits morceaux dans le fond du creuset puis les lingots, en ayant soin de laisser suffisamment de jeu pour permettre leur libre dilatation sans risquer la rupture du creuset. La flamme doit être réglée de façon à être légèrement oxydante.

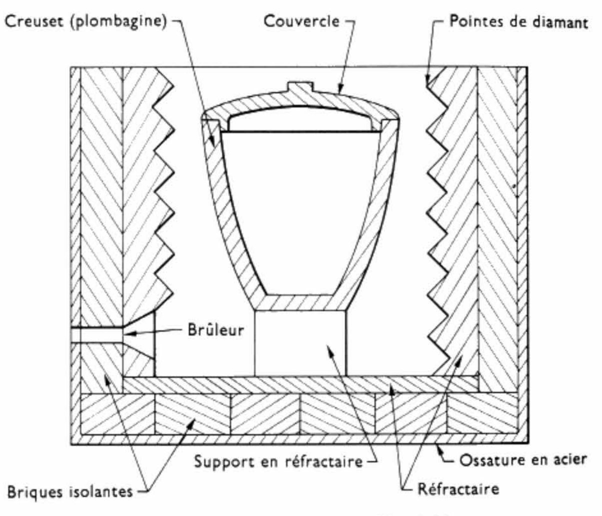


Fig. I-94

Four à creuset réfractaire

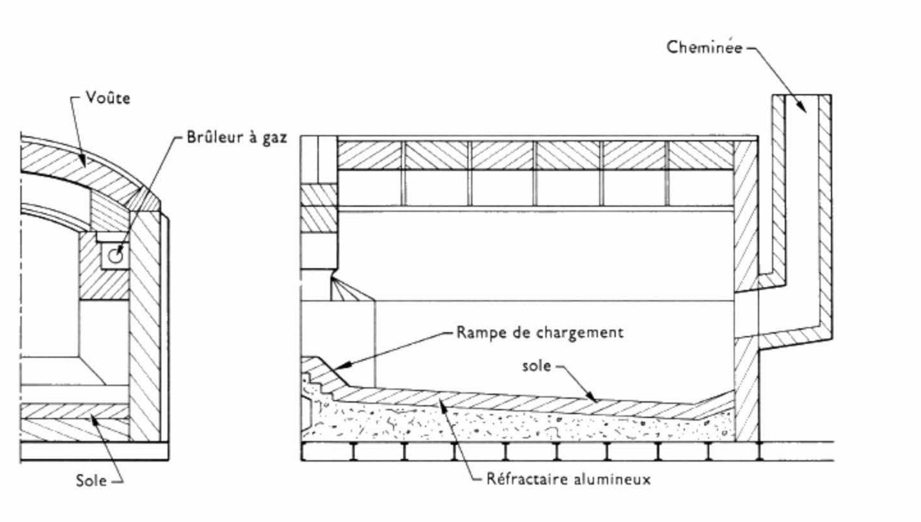


Fig. I-95

Four à sole ou à réverbère

b) *Fours à sole ou réverbère* (fig. I-95) : ces fours ont un revêtement réfractaire alumineux. Ils doivent être parfaitement séchés avant d'être utilisés pour la fusion d'alliages d'aluminium. La charge solide est placée directement sur la sole. Ils sont chauffés soit au gaz, soit à l'huile. La flamme est réglée pour être éclairante au début afin de chauffer par radiation et par convection. Puis, lorsque la voûte est rayonnante, la flamme est réglée de façon à être oxydante. Un rendement de 30 % est satisfaisant.

c) *Fours électriques à induction à basse fréquence :*

- *À canal* (fig. I-96). Ces fours peuvent fondre environ 2,5 kg d'alliage par kilowattheure et la perte au feu est plus

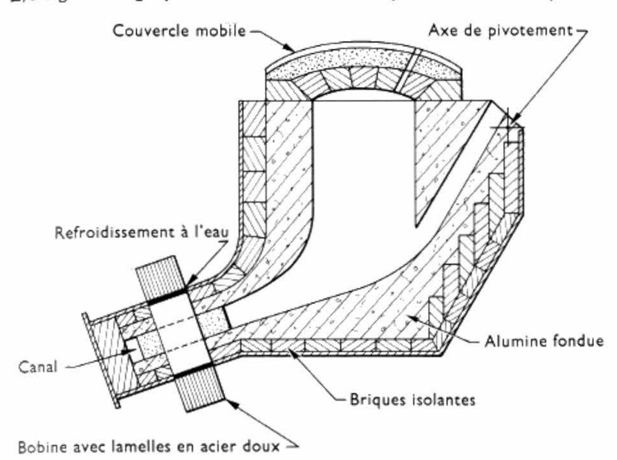


Fig. I-96 — Four à induction à canal

faible que dans les fours à creusets ou à sole, de sorte que l'alliage est plus propre. Ils sont généralement revêtus d'un garnissage d'alumine fondue, d'une épaisseur variant entre 100 et 150 mm. Ils nécessitent un pied de bain permanent.

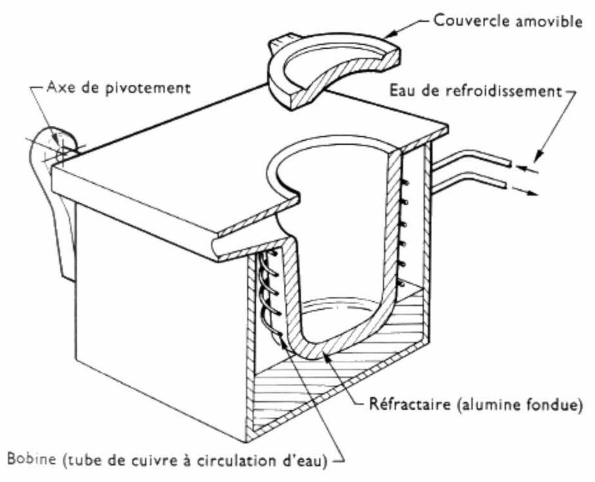


Fig. I-97 — Four à induction sans canal

- *Sans canal* (fig. I-97). Les fours sans canal peuvent être complètement vidés après chaque fusion. Le mouvement imprimé au bain par les courants induits permettent de le brasser et de fondre rapidement les additions solides. La consommation est un peu plus grande que pour les fours à canal : 2 kg d'alliage nécessitent 1 kilowattheure.

d) *Fours électriques à résistance* (fig. I-98) : ces fours sont de petite capacité et réservés surtout pour le maintien d'une quantité limitée d'alliage à l'état fondu.

2° *Coulée*

a) *Dégazage :* le bain doit être dégazé avant coulée. Pour cela on utilise :

- *le chlore :* gaz très bon marché mais dangereux. Il nécessite une très bonne aspiration afin d'éviter d'incommoder le personnel ;

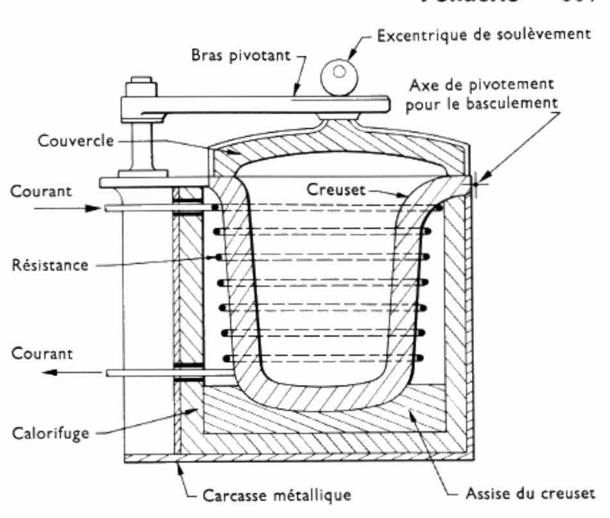


Fig. I-98 — Four à résistance

- *le chlore et l'azote :* le mélange contient 10 ou 30 % de chlore ;
- *l'hexachloréthane :* à l'état solide, il est plongé dans le bain d'alliage dans lequel il se décompose en dégageant du chlore.

La durée du dégazage doit être de 5 mn au minimum pour un creuset de 30 kg. Elle peut durer plus longtemps pour de fortes capacités.

b) *Contrôle de la température :* la température doit être réglée à la valeur désirée à 10 °C près. Elle est donnée par l'expérience en fonction de la nuance d'alliage à couler et de la difficulté de venue propre à chaque moulage. Il est préférable de couler avec des poches de faible contenance, seulement deux ou trois moules, afin que la température de coulée ait la valeur désirée.

5.5. Le magnésium et ses alliages. — Le magnésium a été isolé par Davy en 1808, en faisant agir de la vapeur de potassium sur de la magnésie. Bussy, en 1829, a obtenu du magnésium par réduction du chlorure de magnésium $MgCl_2$ par le potassium. En 1852, Bunsen a réalisé l'électrolyse ignée du chlorure de magnésium $MgCl_2$ fondu.

Sainte-Claire Deville fit agir de la vapeur de sodium sur un mélange ($MgCl_2$, NaCl, CaF_2) ; puis affina le magnésium obtenu par distillation.

Actuellement, on obtient le magnésium par réduction du mono-oxyde de magnésium MgO lui-même fourni par la calcination d'un carbonate de magnésium (giobertite).

Vers 1 600 °C et en présence d'un réducteur énergique comme le carbone il se produit la réaction schématisée par l'équation chimique suivante :

$$MgO + C \rightarrow Mg + CO \nearrow$$

L'oxyde de carbone est éliminé au fur et à mesure que l'opération se déroule ; 1 kg de magnésium demande entre 16 et 18 kWh. On utilise aussi la réduction par le silicium.

Affinage : le magnésium est refondu dans des fours électriques à résistance sous flux (chlorure et fluorure). La décantation des impuretés est accélérée par brassage. Quelquefois, un deuxième raffinage est obtenu par sublimation.

5.5.1. Propriétés du magnésium

1° *Propriétés mécaniques* (magnésium à 99,5 %) :

— coulé en sable : $R_t = 11$ à 12 daN/mm² ; $R_e = 2$ à 3 daN/mm² ; $A = 6$ % environ ;

— filé : $R_t = 18$ à 22 daN/mm², $A = 8$ à 12 % ;

— module d'élasticité : $E = 4\,700$ daN/mm².

Cela impose de choisir des formes compactes et nervurées.

2° *Propriétés chimiques :*

Le magnésium s'oxyde à chaud et la réaction est très exothermique

$$2\,Mg + O_2 \rightarrow 2\,MgO + 2 \times 5{,}98.10^6\ J$$

À froid, l'azote ne réagit pas sur le magnésium mais à chaud il se forme un nitrure pulvérulent brun à chaud, verdâtre à température ordinaire.

$$3\,Mg + N_2 \rightarrow Mg_3\,N_2$$

La nitruration commence avant la fusion. La réaction est beaucoup plus active en présence d'humidité. Entre 651 et 675 °C, les nitrures sont instables et il suffit de couler à une température supérieure à 675 °C pour en débarrasser le métal.

Le magnésium réagit avec l'eau :

$$Mg + H_2\,O \rightarrow MgO + H_2 \nearrow$$

Cette réaction se produit lentement à froid mais devient très active lorsque la température s'élève au-dessus de 70 °C. Aussi, ne faut-il jamais refroidir le magnésium avec de l'eau.

Le magnésium peut être réduit par le gaz carbonique :

$$7\,Mg + 3\,CO_2 \rightarrow 6\,MgO + \underset{\text{Carbure de magnésium}}{Mg\,C_2} + \underset{\text{Carbone libre}}{C}$$

Toutes les précautions doivent être prises en fonderie pour éviter cette réaction.

5.5.2. Principaux alliages de magnésium. — Il n'existe pas de différence pratiquement entre les alliages de magnésium utilisés pour la forge et ceux employés en fonderie.

Après coulée, ils peuvent subir un traitement d'homogénéisation. Quelquefois on leur applique un traitement thermique complet : mise en solution suivie de trempe, puis précipitation de la solution solide hors d'équilibre par recuit à 150 °C car, contrairement aux alliages légers, la solution solide reste stable à la température ambiante et il ne se produit pas de précipitation structurale si elle n'est pas provoquée par le recuit à 150 °C. On peut aussi porter l'alliage à une température légèrement inférieure à celle du solidus (340 °C pour le magnésium-zinc, 436 °C pour le magnésium-aluminium et 485 °C pour le magnésium-cuivre) de façon à mettre en solution solide la quantité maximale d'un composé défini (en général Mg_3Al_4), puis un refroidissement à l'air est suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide qui existait à la température élevée. On obtient un état homogène.

Les principaux alliages de magnésium se classent en cinq familles principales :

1° *Les alliages magnésium-aluminium-manganèse.* — Le manganèse est ajouté dans la plupart des alliages de magnésium dans le but d'en améliorer la résistance à la corrosion. La teneur en manganèse est comprise généralement entre 0,1 et 0,3 %.

La teneur en aluminium varie, suivant les applications, entre 6 et 10 %.

Caractéristiques mécaniques (approximatives) :

— Alliage G-A6-M (Mg + 6 % Al + 0,1 % Mn) :

- coulé en sable : $R_t = 16$ daN/mm², $A = 4$ à 5 % ;
- filé : $R_t = 27$ à 29 daN/mm², $A = 15$ à 18 %.

— Alliage G-A9-M (Mg + 9 % Al + 0,1 % Mn) :

- coulé en sable : $R_t = 18$ daN/mm², $A = 4$ à 6 % ;
- filé homogénéisé : $R_t = 24$ à 27, $A = 8$ à 12 %.

2° *Les alliages magnésium-aluminium-zinc-manganèse :*

— Alliage G-A6-Z3-M (Mg + 6 % Al + 3 % Zn + 0,15 % Mn) :

- coulé en sable : $R_t = 17$ à 20 daN/mm², $A = 4$ à 6 % ;
- filé : $R_t = 23$ daN/mm², $A = 6$ à 10 %.

— Alliage G-A9-Z2-M (Mg + 9 % Al + 2 % Zn + 0,1 % Mn) : cet alliage se développe rapidement.

3° *Les alliages magnésium-zinc-zirconium-terres rares.* — Le cérium est ajouté sous forme de mischmétal et son addition améliore la tenue à chaud des alliages. C'est l'élément des terres rares le plus utilisé. Ces alliages sont du type : Mg + 2,5 % Zn + 0,6 % Zr + 2,5 à 3 % de mischmétal (à 50 % de cérium environ) et ils ont les caractéristiques mécaniques suivantes :

— à l'état brut de fonderie :

$R_t = 14$ à 17 daN/mm², $R_e = 8$ à 10 daN/mm² } $A = 3$ à 6 % ;

— vers 200 °C :

$R_t = 13$ à 15 daN/mm², $R_e = 7$ à 7,5 daN/mm² } $A = 20$ à 25 %.

Ils sont utilisés surtout pour les moteurs d'aviation (parties des moteurs à réaction restant à la température ordinaire).

4° *Les alliages magnésium-thorium-zirconium.* — Le plus utilisé contient 3 % de thorium et 0,7 % de zirconium. L'incorporation du thorium se fait sous forme pulvérulente dans un creuset de graphite. Cet alliage possède les mêmes propriétés mécaniques que le précédent mais il conserve ses qualités jusqu'à 300 °C environ.

5° *Les alliages magnésium, zirconium, terres rares.* — Les plus utilisés contiennent :

a) 0,3 à 0,6 % de zirconium et 3 à 4 % de terres rares,

b) 2,7 % de zinc, 0,6 % de zirconium et 3,3 % de terres rares.

Ces alliages sont pratiquement exempts de porosités (surtout le deuxième qui a une excellente résistance à la pression). Cependant, ils ont une coulabilité médiocre et ont tendance à former de la crasse et à provoquer des criques de peau. Ils se prêtent mal à la coulée de certaines formes de pièces.

Remarque 1 : Les alliages magnésium-aluminium-manganèse, et magnésium-aluminium-zinc sont faciles à couler et préférés aux autres lorsque leurs propriétés peuvent répondre aux spécifications des pièces à fabriquer.

Remarque 2 : Les alliages magnésium-zinc-zirconium (Mg + 4,5 à 6 % Zn + 0,7 % Zr) ont une résistance à la fatigue à peu près identique à celles des alliages magnésium-aluminium-zinc mais ils sont sujets aux microporosités, aux criques à chaud et, de plus, sont moins facilement soudables.

Remarque 3 : Les alliages magnésium-thorium-zirconium sont plus difficiles à couler que les alliages magnésium-zirconium-terres rares (à cause des inclusions d'oxydes et des défauts occasionnés par la turbulence dans la coulée, qui sont difficiles à éviter) et ils sont surtout utilisés pour la coulée de pièces à parois très épaisses.

5.5.3. Fusion des alliages de magnésium. — Contrairement à l'aluminium, le magnésium ne dissout pas le fer, de sorte que les creusets de fusion et les poches de coulée peuvent être en acier à faible teneur carbone (fer armco en général).

Si la fusion est réalisée dans des fours à induction, le choix du réfractaire doit faire l'objet du plus grand soin car le magnésium liquide peut réagir très brutalement et même d'une manière explosive. Un réfractaire contenant 55 à 60 % de silice (SiO_2) et 45 à 40 % d'alumine (Al_2O_3) donne satisfaction en général.

Le magnésium réagit d'une manière explosive avec l'oxyde de fer ; aussi, faut-il prévoir un dispositif permettant d'enlever les éclaboussures de magnésium qui pourraient tomber autour du creuset ou du four, ainsi qu'un récipient amovible placé au-dessous du creuset destiné à recevoir son contenu dans le cas d'une rupture de creuset.

Un flux protecteur ou du gaz sulfureux doit recouvrir le bain de magnésium pour éviter l'inflammation au contact de l'oxygène de l'air. Si le gaz sulfureux est utilisé, il faut surmonter le four d'une hotte et une petite porte doit être pratiquée dans le couvercle, le gaz sulfureux formant un rideau protecteur. Dans le cas d'emploi de flux ou de gaz sulfureux, la ventilation doit être étudiée avec soin pour évacuer les gaz et fumées.

1° *Les fours utilisés*

a) *Les fours à creuset fixe ou basculant :* ils sont chauffés soit au gaz, soit à l'huile, comme dans le cas des alliages d'aluminium.

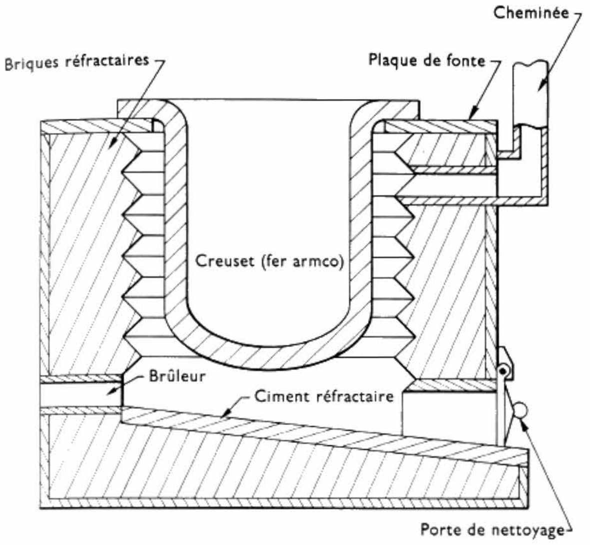


Fig. I-99 — Four à creuset fixe pour magnésium

Les fours à creusets fixes sont réservés aux faibles tonnages (fig. I-99).

Pour des quantités importantes d'alliage, on utilise des fours basculants pour la fusion et des fours de faible capacité à creuset amovible (fig. I-100) pour le maintien, les additions éventuelles et le décrassage. Le creuset est utilisé ensuite comme poche de coulée.

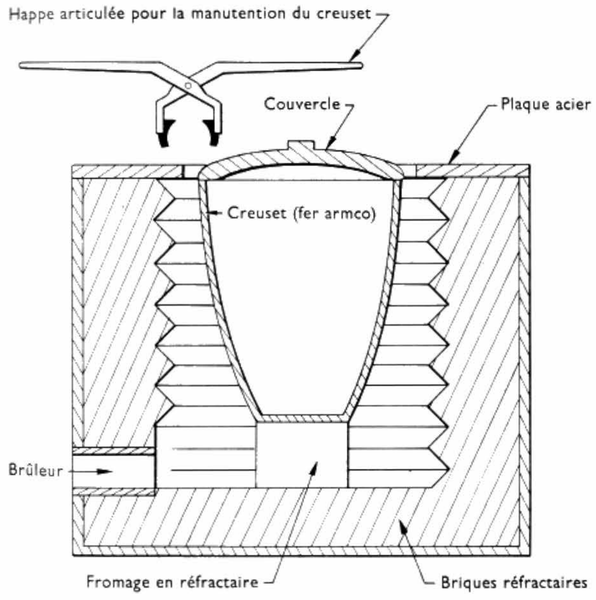


Fig. I-100 — Four à creuset amovible pour coulée du magnésium

b) *Les fours à induction :* Pour des tonnages importants, la fusion proprement dite peut être faite au four à induction (V. fig. I-96 et I-97), le métal fondu est ensuite distribué dans des fours de maintien dans lesquels la composition chimique finale est ajustée.

2° *Les poches de coulée :* elles sont en acier à faible teneur en carbone (fer armco) et munies d'un siphon afin de retenir les crasses du flux (fig. I-101). Les crémoirs de forme hémisphérique, permettent d'enlever le flux sans provoquer de remous du bain. Ils sont en acier à faible teneur en carbone. Les cannes pyrométriques de contrôle des températures sont constituées de fer-constantan ou de chromel-alumel. Ils sont installés à demeure dans le creuset dans des tubes de protection en acier à faible teneur en carbone ou en acier inoxydable sans nickel.

3° *Les flux.* — Ils doivent présenter les caractéristiques suivantes :

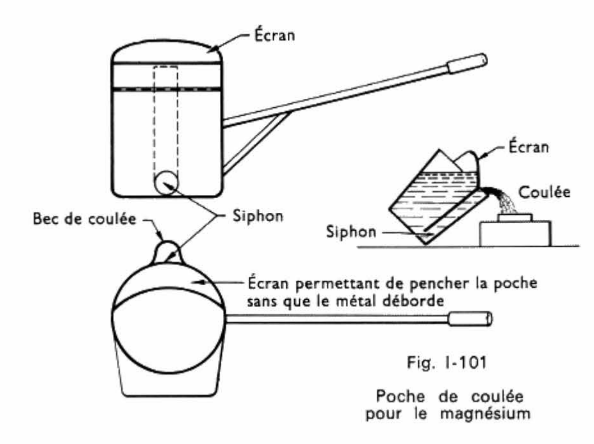


Fig. I-101

Poche de coulée pour le magnésium

— être passifs,

— avoir une température de fusion inférieure à la température de fusion de l'alliage,

— avoir une densité inférieure à la densité du métal,

— avoir une viscosité suffisante pour permettre la séparation facile du métal.

Les flux utilisés (5 % de la masse du métal) sont des mélanges de chlorures, chlorure de magnésium, et chlorure de potassium (carnalite) ou chlorure de baryum, et de fluorures.

Le flux sert de lubrifiant aux impuretés qui se déplacent par différence de densité :

— soit elles montent (masse volumique impureté $<$ masse volumique alliage),

— soit elles descendent (masse volumique impureté $>$ masse volumique alliage).

Nota : Par suite de la faible densité des alliages de magnésium, il est quelquefois nécessaire de faire appel à des flux plus denses mais présentant une tension superficielle qui leur permet d'enrober le métal liquide (fig. I-102).

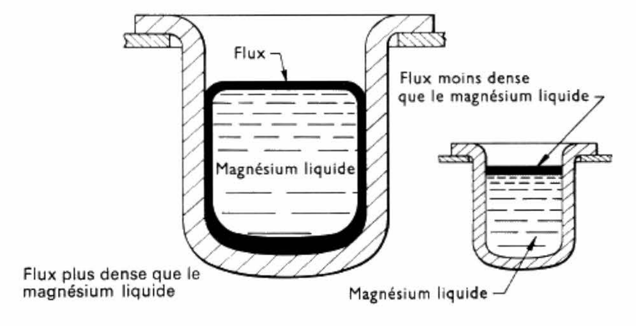


Fig. I-102 — Schéma de fusion avec un flux

4° *Pratique de la fusion*

a) *Fusion proprement dite :* 1,5 % de flux est placé d'abord au fond du creuset vide, puis le métal de la charge, parfaitement propre, exempt d'humidité et d'hydrocarbures (jets, masselottes et évents parfaitement débarrassés du sable), est introduit à son tour. La charge métallique aussi compacte que possible doit adhérer au fond du creuset afin de créer un fond de bain le plus rapidement possible. Cette charge est saupoudrée de flux aussi souvent qu'il est nécessaire et les morceaux solides sont introduits au fur et à mesure de la fusion jusqu'à ce que le creuset soit plein.

La température du bain est portée à 650 °C et le décrassage est réalisé en raclant le fond du creuset à l'aide du crémoir de façon à décoller la scorie et à la recueillir. Le crémoir est ramené à la surface et décanté. Le décrassage est poursuivi aussi longtemps qu'il est nécessaire et au moins une fois par opération. L'excès de flux est également enlevé.

La température de l'alliage est portée alors à 700-725 °C ; le bain est brassé dans son ensemble avec précaution puis recouvert de 1,5 à 2 % de flux. Le bain est maintenu calme pendant dix à quinze minutes et si le crémoir ne

remonte plus de dépôt de scorie, l'alliage est prêt à être coulé.

Les gaz et les impuretés non métalliques sont éliminés par barbotage de chlore. Le chlorure de magnésium formé est fondu et absorbe toutes les impuretés et oxydes en suspension dans le bain. La température la plus favorable pour ce traitement d'une durée de cinq à quinze minutes est comprise entre 725 et 760 °C.

b) *Affinage du grain :* deux méthodes sont utilisées pour l'affinage, ce sont la surchauffe du bain et l'addition de carbone.

• *Surchauffe du bain :* l'alliage est porté à 900-925 °C. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la coulée a lieu aussitôt après la surchauffe. De toute façon, il ne faut pas laisser descendre la température de l'alliage au-dessous de 850 °C.

• *Addition de carbone :* l'inoculation de carbone est réalisée par l'intermédiaire de composés organiques, (soit hexachloréthane, soit hexachlorobenzène), à raison d'environ 6 % de la masse d'alliage et à une température comprise entre 760 et 820 °C. Après le traitement, la température doit être maintenue au-dessus de 760° C.

Le carbure de calcium CaC_2 est quelquefois utilisé pour affiner le grain. Il en faut à peu près 1 % de la masse de l'alliage pour réaliser l'affinage. Le traitement n'est efficace que lorsque la température du bain est voisine de 760 °C. Ensuite, le creuset est décrassé puis la température est portée à 790 °C environ. Le carbure de calcium doit être conservé à l'abri de l'humidité et l'addition doit être faite avec beaucoup de précaution afin d'éviter une explosion éventuelle au moment du contact avec le bain liquide. Le traitement doit être renouvelé toutes les trois ou quatre heures et, après chaque traitement, il faut décrasser parfaitement le creuset.

c) *Additions :* l'aluminium et le zinc sont ajoutés sous forme de métaux purs, le manganèse, sous forme d'alliage aluminium-manganèse, de chlorure de manganèse ou de flux contenant du chlorure de manganèse, le zirconium, sous forme d'alliage aluminium-zirconium contenant de 30 à 50 % de zirconium. L'alliage aluminium-zirconium est préchauffé dans une poche et, ensuite, entièrement immergé dans l'alliage liquide afin d'éviter l'oxydation. La température doit être maintenue entre 760 et 820 °C. Le bain est brassé dans la masse afin de bien répartir le zirconium, et recouvert d'un peu de flux ; la température est maintenue entre 760 et 790 °C pendant vingt minutes pour séparer le flux de l'alliage et pour permettre au zirconium de se dissoudre complètement.

5° *La coulée :* l'alliage est prélevé à la poche dans le creuset ; la poche doit être préchauffée et parfaitement propre avant d'être plongée dans le bain pour le prélèvement. La température du bain est comprise entre 700 et 850 °C selon la nuance de l'alliage et selon les pièces à couler. La surface de l'alliage liquide est recouverte d'un mélange 50/50 de fleur de soufre et d'acide borique afin d'éviter l'oxydation. Lorsque l'alliage est prêt à être coulé, la couche formée par ce flux est repoussée vers l'arrière à l'aide d'un crémoir.

Il faut conserver un pied de bain suffisant afin d'éviter l'entraînement du flux dans le moule. Cette précaution est particulièrement importante pour la coulée des alliages magnésium-zirconium et il faut en prévoir une quantité suffisante pour assurer ainsi la santé de la pièce.

Après la coulée, les parois du creuset sont nettoyées et la scorie et l'écume sont enlevées avec soin.

a) *Sécurité :* des mesures très strictes de sécurité doivent être observées afin d'éviter les accidents : instruments utilisés parfaitement propres et secs ; flux et charges métalliques très secs ; personnel muni d'équipements ignifugés ; creusets exempts de toute trace d'oxydation.

b) *Sable de moulage :* par suite de la faible masse volumique des alliages de magnésium, le remplissage des moules ne s'effectue correctement que si l'air de l'empreinte s'évacue aisément. Il faut donc un sable à perméabilité élevée et il faut prévoir de nombreux évents.

Le magnésium réagit sur l'oxygène de l'air et sur l'humidité de l'air et du sable ; il faut donc ajouter au sable des éléments qui forment une atmosphère écartant les risques d'inflammation de l'alliage. Les éléments inhibiteurs les plus courants sont le soufre, l'acide borique, le fluoborate de potassium et le fluoborate d'ammonium ; utilisés intimement mélangés, ils donnent une atmosphère réductrice :

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$2\,F(NH_4) + Mg \rightarrow MgF_2 + 2NH_3 + H_2$$

Quelquefois, avec l'acide borique, on ajoute du glycol-diéthylène afin de réduire la quantité d'eau de préparation, d'une part, et de s'opposer au séchage du sable, d'autre part.

Voici une composition de sable type : sable siliceux : 65 à 70 % ; argile : 5 % ; eau : 2 à 3 % ; soufre : 1,5 à 2 % ; acide borique : 1,5 à 2 % ; fluoborate de potassium : 0,5 % et glycol-diéthylène : 1,5 à 2 %.

La cohésion est comprise entre 700 et 900 g/cm² et la perméabilité entre 80 et 140.

c) *Filtres :* afin d'éviter d'introduire des impuretés (sable, écume, scorie) avec l'alliage dans l'empreinte, des toiles métalliques en acier ou des tôles fines perforées de nombreux petits trous sont placées au pied du jet de descente de façon que le métal soit forcé de les traverser avant de remplir l'empreinte. Quelquefois, on utilise aussi de la laine d'acier ou des tissus de verre assez lâches pour laisser passer le métal tout en retenant les impuretés. La coulée doit se faire sans provoquer de remous et en dépression, comme pour les pièces coulées en alliages d'aluminium. Elle ne doit pas être en chute directe ; elle exige un bassin intermédiaire afin d'éviter l'oxydation de l'alliage et l'entraînement de l'oxyde dans la pièce. Les bassins peuvent être soit en fonte, soit en sable (ordinairement utilisé pour le moulage de l'alliage) parfaitement serré dans une boîte à noyaux. La dimension du bassin doit être proportionnée au volume du métal à couler.

5.6. Alliages de zinc (norme NF A 55-010). — Les alliages de zinc connaissent un essor considérable depuis que l'on a décelé les causes des déboires des premiers essais et que la métallurgie du zinc a pu mettre un zinc d'une grande pureté (99,995 %) à la disposition des fondeurs sous pression.

Les éléments indésirables considérés comme impuretés, avec les taux limites à ne pas dépasser pour chacun d'eux, sont :

Plomb	Cadmium	Étain	Fer
0,004 %	0,003 %	0,002 %	0,075 %

En France, trois alliages sont utilisés pour la coulée sous pression. Ils ont pris le nom de *zamack* (en Angleterre *mazack*). Leur composition chimique est donnée, avec leurs caractéristiques mécaniques, dans le tableau ci-après :

Désignation	Zinc (%)	Aluminium (%)	Cuivre (%)	Magnésium (%)	Résistance à la rupture R_t (daN/mm²)	Allongement *A* (%)	Dureté Brinell (hbar)
Z-A 4 G	le complément	3,9 à 4,3	0	0,03 à 0,06	24 à 28	2,5 à 3,5	80
Z-A 4 U 1 G	le complément	3,9 à 4,3	1	0,03 à 0,06	29 à 33	1,0 à 2,5	90
Z-A 4 U 3	le complément	3,9 à 4,3	3	0,03 à 0,06	32 à 36	0,5 à 1,5	100

Ces alliages se moulent très bien, soit en coquille par gravité, soit sous pression. La masse des pièces fabriquées en zamack varie de quelques grammes (crochet de fermeture éclair) à plusieurs kilogrammes (carter de balance) et cette fabrication, par suite de la précision dimensionnelle des pièces obtenues (elles permettent un montage brut ou avec un usinage très réduit), intéresse un large éventail d'industries utilisatrices : celles de l'automobile (carburateur, pompe à essence, enjoliveurs, poignées), du cycle et du motocycle, des appareils ménagers, des appareils de bureaux, de l'électricité, des télécommunications, de la quincaillerie, de la serrurerie, de l'optique, du cinéma, de la photographie, des jouets, etc.

5.6.1. Les fours de fusion et de maintien. — Étant donné la température de fusion du zamack, environ 390 °C, le four de maintien est en général incorporé dans la machine à coulée sous pression, qui est une machine à chambre chaude (V. fig. I-76). Les creusets sont, en général, en fonte grise ou en fonte à graphite sphéroïdal. Les poches de transfert sont soit en fonte grise, soit en acier.

Pour l'injection la température de l'alliage est de 400 °C en moyenne et doit être contrôlée fréquemment (à ± 5 °C près). La température du moule métallique doit être maintenue entre 175 et 250 °C, selon l'épaisseur des pièces à fabriquer.

5.6.2. Les lubrifiants. — Les moules métalliques sont enduits toutes les cinq ou six injections d'un lubrifiant constitué, soit par de l'huile diluée au pétrole ou au kérosène, soit par du graphite ou du silicone dans de l'eau ; cependant, dans le cas d'éléments avec de l'eau, les éjecteurs et les broches doivent être lubrifiés à l'huile pour éviter leur grippage.

5.6.3. Le contrôle de la composition de l'alliage. — Les alliages de zinc ont des propriétés qui sont très sensibles à la variation de la composition chimique. Cependant, les limites permises dans les teneurs des éléments d'addition sont assez larges et un contrôle régulier permet de maintenir la composition chimique désirée pour l'alliage. Les précautions courantes relatives à l'agitation du bain et à sa surchauffe, qui risquent d'accroître les pertes par oxydation de certains éléments, doivent être observées ; les retours doivent être propres et secs.

5.6.4. Le flux. — Il n'est pas nécessaire d'utiliser de flux protecteur pour la fusion de lingots propres mais, lorsqu'on refond les jets et les rebuts, il est prudent de recouvrir le bain de 5 à 10 % de flux constitué de chlorure ou de fluorure de zinc.

5.6.5. Influence des éléments d'addition

— *Aluminium :* l'aluminium est ajouté au zinc pour réduire l'attaque du creuset ou des outils en fonte ou en acier par le zinc ; l'aluminium augmente la fluidité et améliore la coulabilité de l'alliage. Il forme avec le zinc un eutectique qui fond à 380 °C, de sorte que la température de fusion de l'alliage est inférieure de 30 °C environ à celle du zinc pur. La teneur en aluminium est comprise entre 3,9 et 4,3 %, car l'eutectique à 5 % d'aluminium est fragile et doit être évité.

— *Magnésium :* le magnésium écarte le risque de corrosion intragranulaire mais sa teneur doit être comprise entre 0,03 % et 0,06 % car, à teneur plus élevée, il diminue l'allongement, augmente l'aptitude à la crique et également la dureté.

— *Cuivre :* le cuivre réduit l'influence des impuretés, augmente la dureté et la résistance de l'alliage. Cependant, au-dessus de 1,25 %, les dimensions des pièces ne sont pas stables dans le temps.

— *Fer :* au-dessus de 0,02 %, il forme avec l'aluminium un composé dur qui peut gêner au moment du polissage et qui peut émousser les outils d'usinage.

— *Nickel, chrome, silicium et manganèse :* ils ont une faible solubilité : nickel : 0,02 %, chrome : 0,02 %, silicium : 0,035 % et manganèse : 0,05 %. Au-dessus de ces teneurs, ils forment avec l'aluminium des constituants légers qui surnagent et qu'il faut écumer sur le bain.

— *Plomb, cadmium et étain :* au-dessus des teneurs limites indiquées précédemment, ils provoquent des gonflements, des criques ou des déformations.

6. APPAREILS POUR FUSION DE LA FONTE

6.1. Le cubilot à vent froid. — Le cubilot est l'un des plus anciens appareils de fusion et, quoique de nombreuses améliorations lui aient été apportées, sa forme générale a peu évolué (fig. I-103).

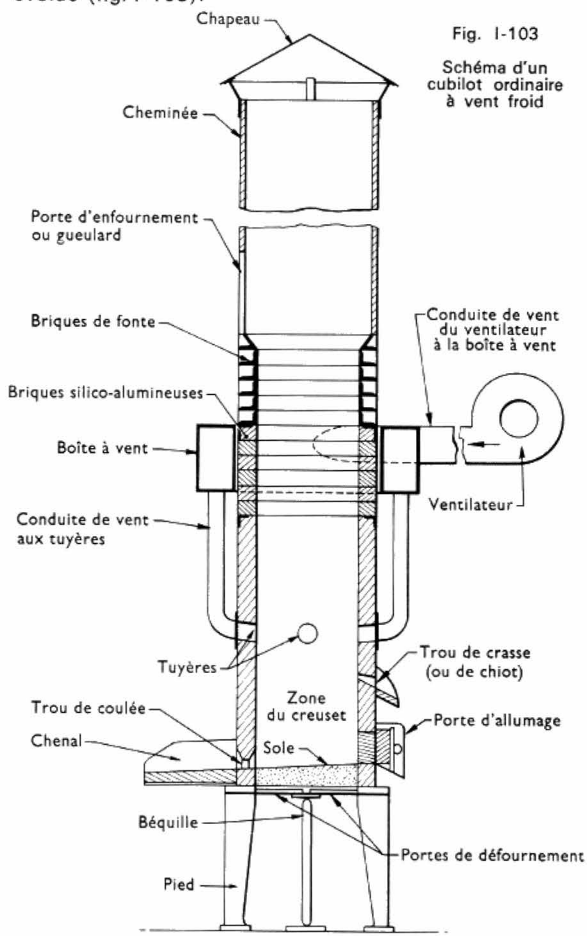


Fig. I-103
Schéma d'un cubilot ordinaire à vent froid

Le cubilot doit sa pérennité à son rendement thermique qui est supérieur à celui de tous les appareils de fusion. Il peut atteindre 40 %, soit le double du rendement thermique des fours rotatifs et le triple de celui des fours à creuset. Le cubilot doit cet avantage au fait que les charges métalliques sont intimement mélangées au remarquable combustible solide qu'est le coke, combustible qui permet d'obtenir des températures avoisinant 1 700 °C.

6.1.1. Fonctionnement du cubilot. — Le cubilot étant prêt à la fusion (portes de défournement fermées, sole et trou de coulée préparés, porte d'allumage obturée et niveau supérieur du coke enfourné bien allumé et réglé à une distance convenable au-dessus des tuyères) le ventilateur est mis en route et les tuyères ouvertes. L'air qui pénètre dans la colonne du cubilot permet au coke en ignition de brûler suivant la réaction exothermique :

$$C + O_2 + 4\,N_2 \rightarrow CO_2 + 4\,N_2 + 408\text{ kJ (oxydation)} \quad (1)$$

La température s'élève et le carbone du coke réagit sur le gaz carbonique formé. La réaction est endothermique :

$$C + CO_2 + 4\,N_2 \rightarrow 2\,CO + 4\,N_2 - 285\text{ kJ (réduction)} \quad (2)$$

La température diminue alors.

Il s'établit un équilibre et ces deux réactions deviennent concomitantes. On peut schématiquement partager le cubilot en différentes zones (fig. I-104 a) :

— 1 : la zone du creuset dans laquelle il ne se produit pas de combustion ;

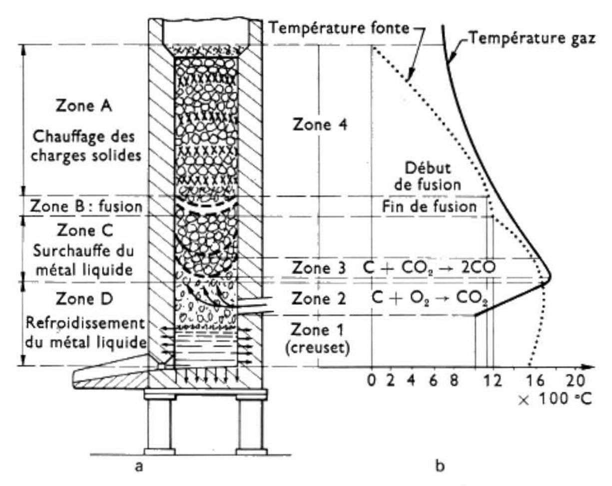


Fig. I-104 — Fonctionnement d'un cubilot

— 2 : la zone immédiatement située au-dessus des tuyères dans laquelle la réaction oxydante (1) est prépondérante et dans laquelle la température s'élève graduellement ;

— 3 : la zone de réduction dans laquelle la réaction de réduction (2) abaisse la température ;

— 4 : la zone située à la partie supérieure du cubilot où les équilibres physico-chimiques sont établis et dans laquelle il n'y a pas de combustion.

(Il est probable que dans les zones d'oxydation et de réduction, lorsque la température est suffisamment élevée, la réaction schématisée par l'équation chimique :

$$2C + O_2 + 4N_2 \rightarrow 2CO + 4N_2 + 123 \text{ kJ}$$

se produit directement).

Si le débit d'air est augmenté, la hauteur de la zone d'oxydation croît et la température maximale atteinte est plus élevée. Si le débit d'air est diminué on observe les variations inverses.

Si l'on prend les températures dans le cubilot, suivant une verticale, on obtient la courbe caractéristique tracée sur la figure I-104 b.

Il existe un débit optimal d'air : pour brûler un kilogramme de carbone en gaz carbonique il faut environ 8,90 m³ d'air et pour brûler un kilogramme de carbone en oxyde de carbone il faut environ 4,45 m³ d'air.

Dans les meilleures conditions, de nombreux chercheurs ont obtenu la composition des gaz de combustion suivante :

$$CO_2 : 15\ \% ; \quad CO : 11\ \% ; \quad N_2 : 74\ \%$$

avec une température avoisinant 1 710 à 1 720 °C. Le débit d'air nécessaire est alors de 7 m³ par kilogramme de carbone brûlé. Comme le coke contient environ 90 % de carbone fixe, il faut donc $0{,}9 \times 7 = 6{,}3$ m³ d'air environ pour brûler un kilogramme de coke dans les conditions optimales de fonctionnement du cubilot.

6.1.2. Dimensions à donner aux cubilots. — Lorsque les charges métalliques sont enfournées dans le cubilot, il faut qu'elles arrivent à la température de fusion à une distance des tuyères telle que les gouttes métalliques provenant de leur fusion atteignent la température optimale en ruisselant sur le coke incandescent. L'échauffement des charges est représenté par la courbe de la température de la fonte (V. fig. I-104 b) et la colonne du cubilot peut être divisée en quatre zones :

— A : la zone immédiatement au-dessous du gueulard, dans laquelle des charges métalliques s'échauffent pour atteindre la température de fusion : c'est la zone de chauffage des charges solides ;

— B : la zone dans laquelle les charges métalliques fondent : c'est la zone de fusion ;

— C : la zone comprise entre la zone de fusion et celle de la température maximale de combustion du coke, dans laquelle les gouttes métalliques vont s'échauffer encore pour atteindre la température maximale : c'est la zone de surchauffe du métal liquide ;

— D : la zone du creuset dans laquelle la fonte liquide vient s'accumuler et refroidir pendant le temps de séjour : c'est la zone de refroidissement du métal liquide.

1° *Hauteur du cubilot.* — Pour assurer un fonctionnement adéquat du cubilot, il faut :

a) Que le chemin parcouru par les charges métalliques solides du gueulard à la zone de fusion soit suffisamment long pour que leur température passe de la température ambiante à la température de fusion, compte tenu de leur vitesse de descente fonction de la vitesse de combustion du coke.

b) Que la hauteur de ruissellement des gouttelettes métalliques soit suffisante pour leur permettre d'atteindre la température optimale, compte tenu du contact rapide qu'elles ont avec le coke dans leur ruissellement depuis la zone de fusion.

Pratiquement, ces conditions sont assurées lorsque la distance des tuyères au gueulard est au moins égale à 3,50 m. Comme il est avantageux de pouvoir maintenir le niveau supérieur des charges à cette distance minimale, on porte à 4 m cette hauteur utile des cubilots.

2° *Diamètre du cubilot.* — La production horaire moyenne de fonte est environ de 75 kg/dm² de section. Pour un cubilot de diamètre D elle est égale à :

$$P_H = 75 \frac{\pi}{4} D^2 = 60\, D^2 \quad \text{(en kilogrammes si } D \text{ est exprimé en décimètres)}$$

$$= 6\,000\, D^2 \quad \text{(en kilogrammes si } D \text{ est exprimé en mètres)}$$

D'où :

$$D \text{ en décimètres} = \sqrt{\frac{\text{Production horaire en kilogrammes}}{60}}$$

$$\text{ou : } D \text{ en mètres} = \sqrt{\frac{\text{Production horaire en tonnes}}{6}}$$

3° *Masses des charges :*

a) *Coke :* la hauteur de chaque lit de coke ne doit pas être supérieure à 0,2 m. D'où la masse des charges de coke est égale à (en kilogrammes) : $450 \frac{\pi}{4} D^2 \times 0{,}2 = 70\, D^2$ (masse volumique apparente du coke : 450 kg/m³ ; D est exprimé en mètres).

b) *Charges métalliques :* leur masse se déduit de celle des charges de coke. En fonction du pourcentage p de coke elles sont égales à : $\frac{70 D^2 \times 100}{p} = \frac{7\,000 D^2}{p}$ (kilogrammes).

4° *Épaisseur du garnissage.* — Avec un réfractaire siliceux, les pertes du réfractaire par conduction doivent permettre d'obtenir une température d'équilibre voisine de la température de fusion pâteuse de la silice (afin de réduire au minimum la consommation de réfractaire).

Ce résultat est obtenu pour une épaisseur de réfractaire comprise entre 0,16 m et 0,2 m. Le diamètre de la tôlerie extérieure est donc égal à : $(D + 0{,}4)$ mètres.

6.1.3. Vent

1° *Débit du ventilateur.* — Tout cubilot, sauf pour des applications particulièrement constantes en qualité et en quantité, doit avoir un fonctionnement assez souple et modifiable en cours d'utilisation. Le ventilateur, en particulier, doit permettre d'utiliser le cubilot avec le taux maximal de coke entre charges. Pratiquement, compte tenu de la qualité actuelle du coke, il n'est pas nécessaire de consommer plus de 15 % de coke entre charges pour obtenir la température optimale. Le débit du ventilateur est calculé pour ce pourcentage de coke et pour la production horaire indiquée précédemment, avec 7 m³ d'air par kilogramme de coke. Ce débit est égal à :

$$\frac{7 \times 6\,000\, D^2 . p}{100} = \frac{7 \times 6\,000\, D^2\ 15}{100} = 6\,300\, D^2$$

Dans la pratique on prend $7\,000\, D^2$ (on exprime D en mètres et le débit en mètres cubes par heure).

2° *Hauteur manométrique.* — Ce débit doit être assuré quelle que soit la perte de charge créée par la tuyauterie d'amenée, la boîte à vent, les tuyères et la

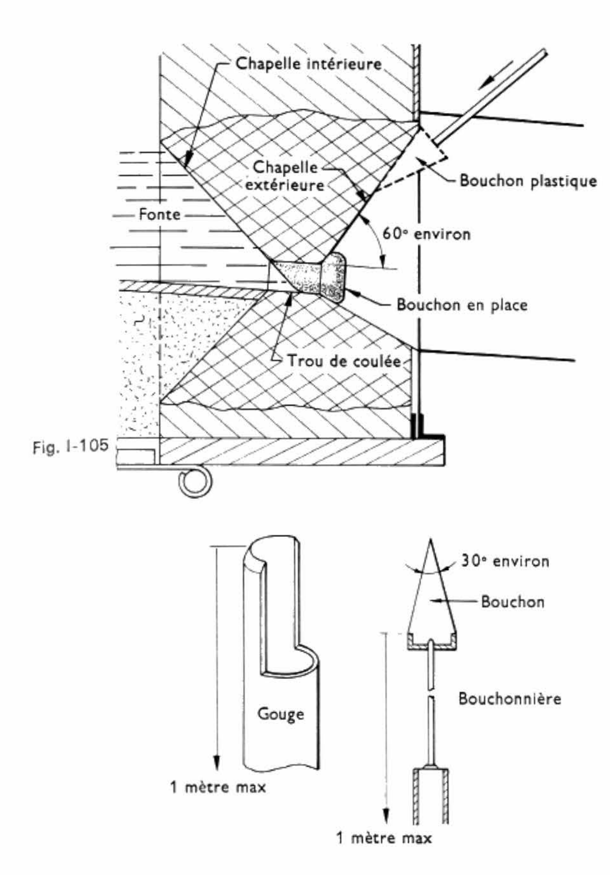


Fig. I-105

colonne de charges dans le cubilot; une formule empirique, qui donne satisfaction dans la plupart des cas, fixe à ($D + 0{,}10$) mètres d'eau la hauteur manométrique totale.

Lorsque des appareils de régulation avec une vanne papillon, un diaphragme ou un venturi, sont interposés sur la conduite, il convient de majorer cette hauteur manométrique de 20 % environ.

3° *Conduite de vent.* — Reliant le ventilateur à la boîte à vent, elle est calculée pour le débit maximal horaire égal à 6 000 D^2 avec une vitesse de 15 m/s.

4° *Boîte à vent.* — La section de la boîte à vent est déduite du diamètre de la conduite de vent. Elle a la forme d'un tore de section rectangulaire $d \times 2\ d$ dont le diamètre intérieur est égal à ($D + 0{,}10$) mètres.

5° *Tuyauteries de jonction de la boîte à vent aux tuyères.* — Elles sont calculées sur la base d'une vitesse de 15 m/s (comme la conduite principale) pour un débit tenant compte du nombre de tuyères à installer.

6° *Tuyères.* — Elles sont cylindriques, forme qui s'est avérée la plus avantageuse. Leur section est calculée sur la base d'une vitesse de l'air de 20 m/s. Pour supprimer les perturbations provoquées par le bouchage partiel d'une ou plusieurs tuyères pendant la marche et pour refroidir le réfractaire alternativement, il est prévu six tuyères autodécrassantes jumelées réparties uniformément sur la circonférence intérieure des cubilots si le diamètre de cette circonférence est compris entre 700 et 900 mm, et huit si ce diamètre est compris entre 900 et 1 100 mm. Au-dessus d'un diamètre de 1 100 mm, le nombre de tuyères jumelées est calculé de façon que leur diamètre ne dépasse pas 200 mm.

6.1.4. Creuset et avant-creuset. — Dans les cubilots courants, la capacité du creuset correspond à environ vingt minutes de production horaire. Cette capacité est obtenue avec une profondeur de bain de 450 mm. Le trou de crasse est percé à 450 mm environ au-dessus de la sole.

Dans l'avant-creuset, pour la même hauteur, cette capacité permet de recevoir la fonte produite pendant une demi-heure (il ne contient pas de coke comme c'est le cas pour le creuset du cubilot ordinaire). En utilisant l'avant-creuset, on supprime la recarburation de la fonte qui se produit dans le creuset du cubilot ordinaire.

Dans certaines conditions d'installation et d'utilisation, l'avant-creuset permet d'obtenir une température de fonte supérieure de 50 °C environ à celle donnée par un cubilot ordinaire.

Piquée et bouchage : pour les cubilots de faible débit horaire, les plus courants en France, le prélèvement de la fonte se fait par piquée directe du cubilot ou de l'avant-creuset. Puis, lorsque la quantité de métal prélevé est suffisante, le jet est interrompu par le cubilotier en plaçant dans le trou de coulée un bouchon en argile plastique contenant 10 % environ de sciure de bois. Il faut détruire ce bouchon à chaque piquée (fig. I-105).

Cette opération est simplifiée par l'utilisation d'un obturateur mécanique permanent. Aux bouchons consommables est substitué un tampon à calotte sphérique constitué d'un mélange de réfractaire siliceux contenant environ 20 % de graphite ; il est cuit dans un four à 1 400 °C environ (fig. I-106).

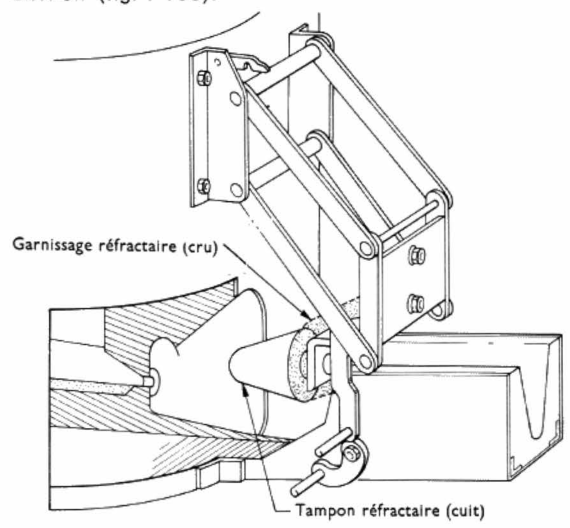


Fig. I-106 — Obturateur mécanique avec bouchon réfractaire

Chenal autodécrasseur : dans les cubilots à production horaire importante (supérieure à 8 t/h), la piquée et le bouchage seraient fastidieux avec le prélèvement par poches de faible capacité (150 à 200 kg). On a recours à la coulée continue qui met en œuvre un chenal autodécrasseur dans lequel la fonte et le laitier produits dans le cubilot coulent d'une façon permanente ; la fonte est reçue dans une poche mélangeuse oscillante qui permet de la distribuer à intervalles réguliers (fig. I-107).

La crasse est généralement transformée en granulés grâce à un courant d'eau froide ; de plus, ces granulés sont entraînés vers un bac de décantation.

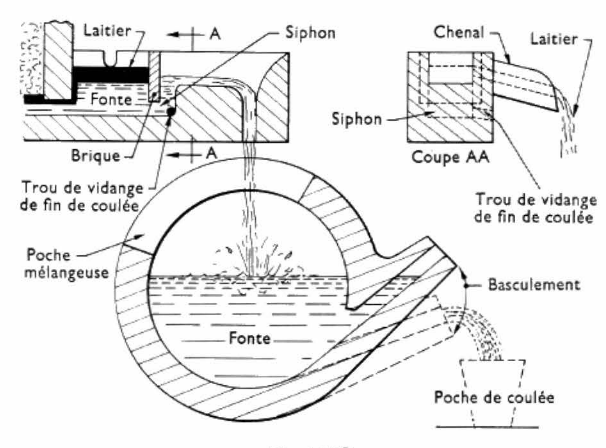


Fig. I-107

L'inconvénient de cette installation est la baisse de température de la fonte : au moins 50 °C et même 100 °C pour les faibles débits.

6.1.5. Chargement des cubilots. — Pour les cubilots de faible diamètre (jusqu'à 700 mm), le chargement est manuel. Au-dessus de 700 mm, il est intéressant d'équiper l'installation d'un appareil de chargement automatique.

Les dispositifs les plus utilisés sont les appareils à benne à fond ouvrant ou à cône, qui sont introduits dans le cubilot par le gueulard et qui déversent les charges verticalement (fig. I-108 et I-109).

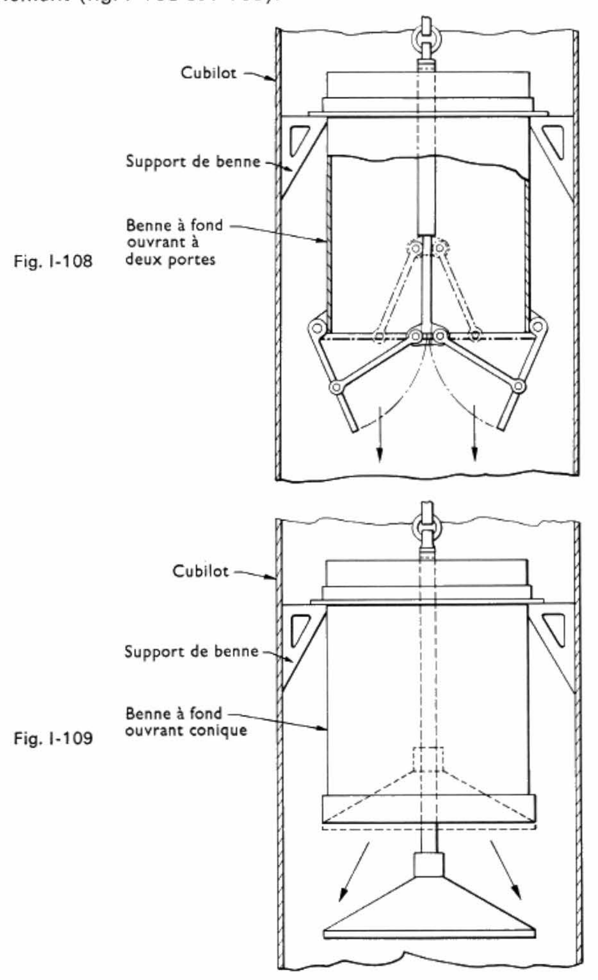


Fig. I-108

Fig. I-109

6.1.6. Résultats métallurgiques

1° *Composition de la fonte*

— *Carbone :* le cubilot permet de recarburer la charge (si celle-ci contient des éléments à faible teneur en carbone comme des riblons d'acier) grâce au contact des parties métalliques et du coke. De ce fait, il n'est pas possible d'obtenir régulièrement, d'une façon permanente, des fontes avec des teneurs en carbone inférieures à 2,20 %, (d'ailleurs, elles n'auraient pas la coulabilité suffisante pour obtenir des pièces saines de faible section).

Le cubilot ordinaire peut fournir des fontes dont les teneurs en carbone sont comprises entre 2,90 et 3,60 %.

Le cubilot avec avant-creuset permet d'obtenir des fontes ayant des teneurs en carbone voisines de 2,3 à 2,4 % environ. La fusion doit être parfaitement conduite afin que la température obtenue confère une coulabilité suffisante.

— *Silicium :* du fait du passage des gouttelettes métalliques liquides dans les zones oxydantes du cubilot, le silicium accuse une perte au feu qui varie de 10 à 35 %, suivant la nuance de fonte élaborée.

— *Manganèse :* pour la même raison que le silicium, le manganèse s'oxyde et la perte au feu pour cet élément est comprise entre 15 et 50 % environ.

Il y a lieu de tenir compte de ces pertes dans le calcul du lit de fusion afin d'obtenir une fonte de composition chimique déterminée.

— *Soufre :* le coke contient de 0,7 à 0,9 % de soufre et une grande partie de cet élément est absorbée par la fonte (surtout si les charges comportent une forte proportion de riblons d'acier). En conséquence il y a lieu de prévoir une addition de manganèse pour neutraliser l'action stabilisante du soufre. Pour les fontes grises on adopte en général une teneur en manganèse égale à 0,30 % plus 1,7 fois la teneur en soufre. On est ainsi à l'abri des inconvénients créés par une teneur en soufre exagérée.

2° *Consommation de réfractaire.* — Dans la zone où la température est maximale, il se produit un ramollissement du réfractaire et les réactions physico-chimiques qui ont lieu à ce niveau entraînent une usure marquée.

La consommation de réfractaire ramenée à la tonne de fonte coulée est comprise entre 15 et 30 kg/t, suivant la nuance de fonte élaborée ; celle qui exige la plus haute température de coulée provoque la consommation la plus grande.

3° *Castine.* — Afin de faciliter l'évacuation des cendres du coke et des produits résultant de l'oxydation et de l'usure du réfractaire, on ajoute à la charge de coke un élément qui joue le rôle de fondant de la crasse (ou scorie) : c'est la castine ou carbonate de chaux. Sous l'action de la chaleur, elle se décompose : ($CO_3Ca \rightarrow CaO + CO_2$) et donne de la chaux vive qui réagit sur la silice du réfractaire et du laitier pour former un silicate complexe contenant de l'oxyde de manganèse et de l'oxyde de fer.

Une trop grande proportion de castine causerait une rapide détérioration du revêtement réfractaire siliceux : on admet couramment une proportion de castine équivalente à 30 % de la masse de coke.

4° *Température du métal.* — Dans les meilleures conditions de fusion, la température de la fonte atteint 1 530 à 1 540 °C à la sortie du chenal. En même temps, le laitier a une bonne fluidité et s'écoule avec facilité.

6.2. Le cubilot à vent chaud. — L'importante quantité de chaleur entraînée par les gaz hors du cubilot a incité les chercheurs à la récupérer ; ils ont abouti à la conception des *cubilots à vent chaud.*

6.2.1. Différents types de cubilots à vent chaud

1° *Cubilots à récupérateur.* — Les gaz sortant du cubilot sont captés et, après épuration des poussières, ils passent dans un échangeur traversé par des tubes à ailettes qui conduisent l'air du ventilateur aux tuyères. Cet air se réchauffe et arrive aux tuyères à une température comprise généralement entre 450 et 500 °C.

Au départ, l'ensemble cubilot-conduites-récupérateur étant froid, la fusion débute comme une fusion à vent froid et avec les mêmes inconvénients (fig. I-110). Ensuite la courbe de température des gaz du cubilot se modifie et passe de la courbe caractéristique du vent froid à celle du vent chaud.

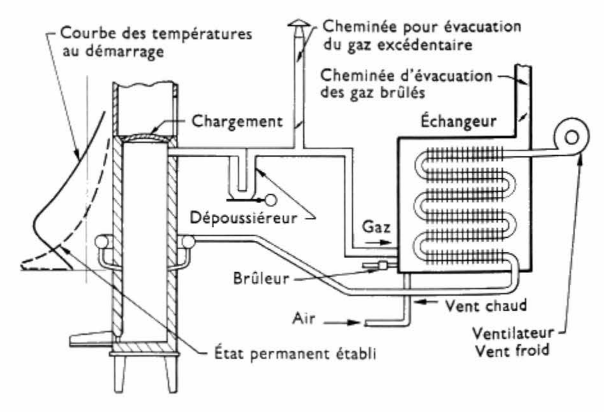


Fig. I-110 — Cubilot à vent chaud à récupération de la chaleur sensible des gaz

2° *Cubilots à réchauffeur et récupérateurs.* — Pour éviter l'inconvénient précédent, l'air est chauffé par des brûleurs à gaz ou à huile dès le début de la fusion. Ainsi les conditions de fusion au vent chaud sont remplies dès la mise en route et la récupération de la chaleur des gaz chauds permet de réduire progressivement cet appoint de chaleur. On les éteint lorsque le régime permanent est établi (fig. I-111).

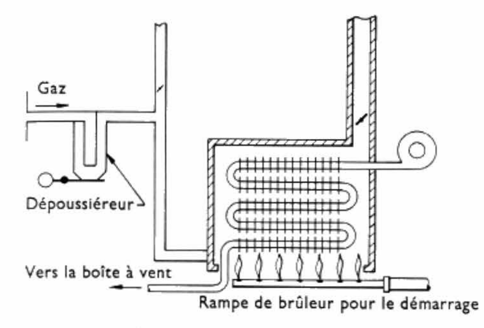


Fig. I-111 — Cubilot à vent chaud à récupération de gaz chauds et chauffage auxiliaire

3° *Cubilots à réchauffeur seul.* — Les gaz récupérés du cubilot sont très chargés de poussières de coke et de sable du fait des jets et retours de fonderie constituant les charges. Ces poussières ne sont pas entièrement éliminées dans le dépoussiéreur et elles se déposent sur les tubes à ailettes de l'échangeur, réduisant considérablement son efficacité.

Il faut procéder à des nettoyages fréquents qui impliquent un arrêt prolongé pour permettre aux appareils de refroidir. Cette sujétion est souvent gênante car les installations ont souvent un ensemble de récupération pour deux cubilots.

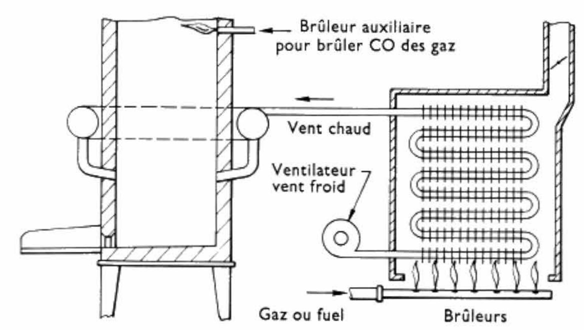


Fig. I-112 — Cubilot à vent chaud, chauffage par brûleurs

C'est pourquoi la solution du réchauffeur indépendant s'est développée. Le vent est réchauffé par des brûleurs et les gaz de combustion sont évacués après que l'oxyde de carbone (CO) ait été brûlé afin d'éviter la pollution (fig. I-112).

6.2.2. Avantages des cubilots à vent chaud. — La combustion a lieu à un niveau très rapproché des tuyères, de sorte que la zone oxydante est très réduite et que la perte au feu en silicium, en manganèse et en fer est très faible (elle dépend de la température adoptée pour l'air chaud ; dans certains cas la silice du réfractaire peut être réduite et on constate même un gain en silicium). La teneur en carbone est très élevée. La production horaire est supérieure de 30 % à celle obtenue par vent froid. La température de la fonte est légèrement plus élevée que dans le cas du vent froid.

6.2.3. Inconvénients des cubilots à vent chaud. — Les investissements sont considérables : ils atteignent dix fois environ ceux nécessités par les cubilots à vent froid. L'entretien, dans le cas de récupération des gaz chauds, est très onéreux. Il n'est pas possible d'obtenir des fontes à faible teneur carbone. Le réfractaire acide ne peut supporter la température développée près des tuyères par la combustion du coke avec du vent chaud, aussi, faut-il adopter des dispositifs de refroidissement énergiques du réfractaire (soit le dispositif des *water-cooling-jackets* à circulation d'eau, soit le dispositif à ruissellement, dont la consommation en eau est importante.

Ces cubilots nécessitent un pourcentage de coke minimal de 13 % pour assurer la stabilité du fonctionnement. Ce pourcentage peut atteindre 18 à 20 % dans le cas de lit de fusion contenant une forte proportion de riblons d'acier car du carbone est nécessaire pour leur recarburation.

De plus la présence permanente d'une forte proportion d'oxyde de carbone dans les gaz circulant dans les différentes parties de l'installation implique des mesures strictes de sécurité afin d'écarter les risques d'explosion et les dangers d'intoxication du personnel.

6.3. Fours électriques

6.3.1. Fours électriques à induction à basse fréquence. — Ces fours à basse fréquence se développent rapidement et remplacent progressivement les installations anciennes de fours rotatifs ou de fours à réverbère. Leur capacité n'a cessé d'augmenter (exemple : four de 54 tonnes pour une fonderie de fonte malléable).

1° *Types de fours.* — Les fours à induction à basse fréquence sont de deux types :

— *Les fours à canal* (V. fig. I-96) : le métal se trouve dans un canal qui forme le secondaire d'un transformateur. Autour de ce canal est enroulé l'inducteur qui est le primaire du transformateur. Le canal est relié au creuset principal du four. Les courants de convection dans le métal liquide assurent les échanges de chaleur entre ces deux parties.

— *Les fours sans canal* (V. fig. I-97) composés d'un creuset réfractaire autour duquel se trouve une bobine de tube de cuivre à section rectangulaire ou carrée. Elle est alimentée en courant à la fréquence du secteur. La bobine est refroidie par circulation d'eau. Les courants induits dans la charge provoquent un échauffement qui permet la fusion des parties solides, puis la surchauffe de l'alliage liquide entretient un brassage incessant qui homogénéise le bain.

2° *Avantages et inconvénients des fours à induction*

— *Fours à canal :* la consommation d'énergie est plus faible que celle des fours sans canal. Toutefois, il faut conserver un pied de bain afin que le canal soit plein pour démarrer la fusion suivante ou, si le four a été vidé, il faut commencer par l'alimenter en fonte liquide pour former le bain de démarrage.

— *Fours sans canal :* un four sans canal peut être vidé complètement après chaque fusion. Il permet de démarrer directement sur charges solides. Toutefois, sa consommation est un peu plus grande que celle des fours à canal.

— *Dans les deux types :* il n'y a pas de recarburation mais on note plutôt une légère perte en carbone, en silicium et en manganèse si le bain est en contact direct avec l'air.

Lorsque la charge nécessite une recarburation, il faut ajouter des chutes d'électrodes de graphite ou de l'anthracite.

3° *Conduite de la fusion.* — La fusion peut être menée four par four, lorsque les qualités de fonte requises sont différentes. Il est aussi possible de fondre en continu en prélevant des quantités pouvant aller jusqu'à 30 % de la quantité de fonte contenue dans le four, ce prélèvement étant immédiatement remplacé par une charge froide d'égale importance.

On emploie également la *fusion duplex* (cubilot-four à induction) : la fusion au cubilot permet de réaliser la recarburation de la charge et le four sert seulement à surchauffer le métal liquide, à l'homogénéiser et pour les additions éventuelles. Ainsi les investissements sont limités à un seul four pour une production quadruplée ou quintuplée. La consommation est d'environ 65 à 75 kWh pour une surchauffe de 100 °C dans un four sans canal, pour une température finale comprise entre 1 500 et 1 550 °C environ.

Ce procédé présente l'inconvénient de fournir une fonte à teneur élevée en soufre (0,12 % à 0,17 % environ). Il impose une désulfuration de la fonte provenant du cubilot si la teneur en soufre doit être impérativement inférieure à 0,02 %, comme c'est le cas pour les fontes à graphite sphéroïdal.

La désulfuration est réalisée à l'aide de soude solvay, ou de carbure de calcium, ou encore de chaux vive. Il faut, pour cela, utiliser une poche à réfractaire basique ou alumineux. S'il est siliceux, il faut le brasquer à l'aide d'une pâte alumineuse passée couche après couche, un temps de séchage étant prévu après chaque application.

4° *Réfractaire.* — En général le réfractaire est composé de silice pure mélangée à 1,2 ou 1,5 % d'acide borique. Il fritte au contact du métal liquide et reste pulvérulent contre la bobine, évitant tout court-circuit en cas de pénétration de métal par une gerce.

6.3.2. Fours électriques à arc. — Avant la mise à la disposition des fondeurs des fours à induction à basse fréquence à canal ou sans canal, le four électrique à arc était utilisé pour la fusion de la fonte grise spéciale, en charge froide ou en duplex avec un cubilot (fig. I-113 et I-114).

Ces fours sont relativement lents pour surchauffer le bain car l'échauffement s'effectue sous chaque électrode. De plus, les fluctuations de tension peuvent provoquer des anomalies de structure dans les pièces coulées.

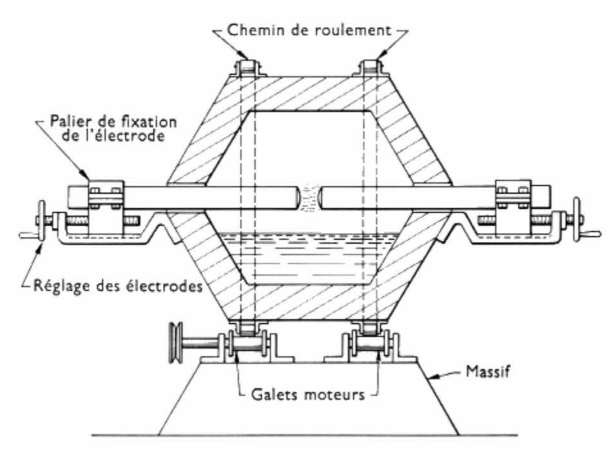


Fig. I-113 — Four électrique à arc indirect oscillant, diphasé ou monophasé

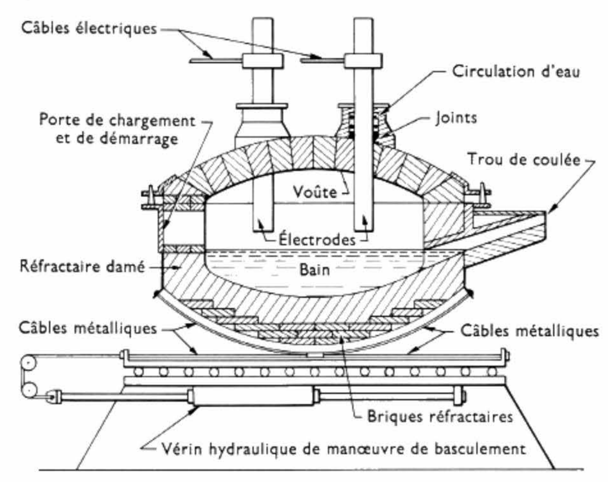


Fig. I-114 — Four électrique triphasé à arc direct

La sole et le creuset ont généralement un revêtement réfractaire basique, en magnésie damée ou en briques de magnésie. Quelquefois, la sole et le creuset sont acides, en réfractaire siliceux damé. Les murs latéraux sont en briques de silice, de même que la voûte. Les électrodes sont en graphite.

La recarburation est obtenue par addition de déchets d'électrodes ou de coke de pétrole enfournés avec la charge de façon à profiter de la température de fusion plus basse de la fonte. Le silicium est ajouté sous forme de ferro-silicium à 45 %, juste avant de prélever la fonte car plus le titre en silicium est bas, plus vite le carbone est dissous.

Le rendement est d'environ 80 % pour le carbone et d'environ 90 % pour le silicium.

La consommation d'énergie électrique est de 500 à 550 kWh à la tonne ; 4 à 5 kg d'électrode sont nécessaires par tonne de fonte.

Dans le cas de la fusion duplex (cubilot + four à arc), la fonte produite au cubilot risque de contenir trop de soufre par suite de l'enrichissement produit par le coke. Comme dans le cas du duplex cubilot-four à induction, il est nécessaire de la désulfurer.

7. APPAREILS POUR FUSION DE L'ACIER

7.1. Fours électriques à arc. — Le four électrique triphasé à arc remplace progressivement les fours Martin dont la durée de fusion est trop longue pour les fonderies d'acier.

Les opérations aux fours à arc se conduisent différemment suivant que le revêtement réfractaire est acide ou basique.

7.1.1. Fours à revêtement réfractaire acide. — Dans ce cas, il n'est possible d'éliminer ni le soufre ni le phosphore, de sorte que les charges doivent être triées pour que leurs teneurs en ces éléments soient faibles. Les petites pièces ou déchets sont d'abord placés au fond de façon à constituer un tas compact bon conducteur de l'électricité, puis les parties plus volumineuses de la charge sont introduites.

La fusion est conduite aussi rapidement que possible ; un peu de sable et un peu de castine sont ajoutés de temps en temps sur le bain pour obtenir une scorie protectrice.

Dès que le bain est formé, on ajoute une bonne quantité de minerai qui dégage de l'oxygène et oxyde le silicium et le manganèse. Lorsqu'une quantité suffisante de manganèse et de silicium est oxydée, le bain se met à *bouillir* sous l'effet de la réaction du carbone sur les oxydes ; il se dégage de l'oxyde de carbone. Finalement, la teneur en carbone du bain se stabilise entre 0,20 et 0,25 %. Le bouillonnement est arrêté en enfournant une fonte à faible teneur en soufre et en phosphore. Puis, du ferro-silicium et du ferro-manganèse sont ajoutés dans le bain. Au moment du prélèvement dans la poche, une petite quantité d'aluminium est ajoutée afin de compléter la désoxydation de l'acier.

7.1.2. Fours à revêtement réfractaire basique. — Le revêtement est constitué soit de magnésie, soit de dolomie. La charge comprend des retours de fonderie et des riblons. Pendant la fusion, de petites quantités de castine sont ajoutées de temps en temps pour former un laitier protecteur. Du minerai de fer est ajouté dès que la fusion est complète, de sorte que la scorie est suffisamment oxydante pour éliminer le phosphore du bain. Aussitôt après la fusion, la première scorie est enlevée et remplacée par une deuxième. Dès qu'elle est fondue, on ajoute du coke pulvérisé et du ferro-silicium : c'est la période d'affinage pendant laquelle les oxydes de fer et de manganèse sont réduits. Il se forme du carbure de calcium qui permet de réduire la teneur en soufre du métal. La teneur en carbone du bain est ajustée par addition de fonte à faible teneur en soufre et en phosphore.

Le four à réfractaire basique est indispensable pour la fabrication des aciers fortement alliés et des aciers inoxydables. Les aciers au chrome ou au manganèse sont préparés au four basique sans perte en chrome ni en manganèse.

7.2. Fours à induction à haute fréquence. — Les fours à induction utilisés pour l'acier sont, en général, à haute fréquence du type courant : le primaire est constitué par l'enroulement d'un tube de cuivre refroidi par circulation d'eau ; le secondaire est représenté par la charge.

Le réfractaire est damé entre une forme en acier et l'enroulement de tubes. La forme fond à la première utilisation du four. Le garnissage est généralement basique.

Le four étant rempli de déchets d'acier on alimente la bobine. Aussitôt que le bain est formé, il se produit un mouvement de brassage intense qui facilite la fusion des parties de la charge encore solides. La fusion rapide permet de réduire la perte au feu des éléments facilement oxydables. Les déchets sont ajoutés au fur et à mesure que les mor-

ceaux sont fondus. Dès que le bain est formé et que la surchauffe nécessaire est atteinte, le bain est désoxydé et coulé. Comme on dispose de dix à quinze minutes entre le moment où la charge est fondue et celui où la surchauffe est obtenue, il est possible d'effectuer des analyses chimiques et des corrections de composition immédiatement avant la coulée.

8. OPÉRATIONS APRÈS LA COULÉE

8.1. Décochage. — Dès que la pièce solidifiée est suffisamment refroidie, le moule est détruit :

— soit à la main, sur le sol même de la fonderie ou sur une grille fixe, à l'aide de masse ;

— soit automatiquement, sur une grille à secousses ou vibrante : le sable passe à travers les barreaux de la grille, sur lesquels les pièces et les châssis sont maintenus. Le sable est recueilli sur un tapis transporteur qui le ramène vers la sablerie, où il séjournera en attendant son réemploi. Cette opération prend le nom de « décochage ».

8.2. Débourrage. — Après le décochage, le sable encore adhérent aux pièces, ou celui provenant de noyaux qui reste contenu dans les évidements intérieurs ou extérieurs, est détaché à la main ou à l'aide d'outils vibrants (étudiés en fonction de la forme des pièces) ou à la brosse métallique : c'est le « débourrage ».

Dans certaines fabrications de pièces en grande série comportant des noyaux très enveloppés de fonte, telles que des éléments de radiateurs ou de chaudières de chauffage central, le débourrage du sable à noyaux est exécuté sur des machines étudiées spécialement pour cette opération : les éléments, suspendus aux crochets d'une chaine transporteuse, reçoivent des petits chocs répétés au cours de leur passage devant des roues à barreaux animées d'un mouvement de rotation uniforme assez lent ; ces chocs accélèrent l'extraction du sable à noyaux de l'intérieur des pièces.

— *Procédé « Hydroblast »* : le débourrage des pièces de grandes dimensions, ou de dimensions moyennes mais fortement noyautées, est quelquefois obtenu par voie humide : un puissant jet d'eau, contenant parfois en suspension du sable fin ou un abrasif pulvérulent, est dirigé sous pression très élevée sur la pièce à nettoyer. Le sable adhérent aux pièces se détache et est entrainé par l'eau. L'installation est complétée par des bacs de décantation dans lesquels le sable est séparé de l'eau par sédimentation, et par un dispositif de séchage du sable avant son réemploi. Ce processus, peu utilisé en France, est connu aux États-Unis d'Amérique sous le nom d'« Hydroblast ».

8.3. Dessablage

8.3.1. Tonnelage. — Dans le but de parfaire leur nettoyage, les pièces sont chargées dans un tonneau avec des étoiles en fonte dure. Pendant la rotation, les chocs et le frottement des étoiles sur les pièces les débarrassent du sable adhérent : c'est le « tonnelage ».

8.3.2. Sablage et grenaillage. — Lorsque les pièces sont trop délicates ou d'une dimension telle qu'elles ne peuvent pas être tonnelées, pour leur décapage final on utilise :

— soit la projection à l'air comprimé de sable siliceux anguleux ou de matière abrasive pulvérulente comme le corindon : c'est le sablage ;

— soit la projection, à l'aide de turbines à palettes tournant à grande vitesse, de grenailles de fonte ou d'acier : c'est le grenaillage.

Exemple : les pièces coulées en alliage d'aluminium ou de magnésium et en alliage cuivreux sont sablées ; les pièces en fonte, en aciers ordinaires ou alliés sont grenaillées de préférence (elles peuvent être sablées également, mais la durée du sablage est nettement plus longue que celle du grenaillage).

8.4. Ébarbage

8.4.1. Enlèvement des attaques de coulée, des évents et des masselottes. — Les pièces ou grappes de pièces débarrassées de leur sable doivent être séparées de leur dispositif de coulée, des évents et des masselottes éventuels, avant d'être ébarbées.

La séparation des canaux de coulée, des évents et des masselottes des pièces de petites ou de moyennes dimensions, coulées en fonte grise ou en fonte blanche, est obtenue à coups de marteau ou de masse.

Mais lorsque les pièces sont coulées en alliages plus résistants il faut faire appel à d'autres techniques :

— Les coulées, évents et masselottes des pièces en alliage d'aluminium, de magnésium et d'alliages cuivreux sont détachés à la scie à main ou à la scie à ruban (l'angle de coupe des dents est particulier à chaque nuance d'alliage à scier), ou à la cisaille.

— Pour les pièces en acier ordinaire ou faiblement allié, dans certaines aciéries on utilise de puissantes scies circulaires. Cependant le chalumeau découpeur oxyacétylénique est d'un emploi plus universel et plus souple. Il est indispensable de sabler ou de grenailler la partie à découper.

— Lorsque les cols de liaison des masselottes à la pièce atteignent de fortes sections, le démasselottage nécessite un véritable usinage sur machines-outils ; les plus couramment employées sont la scie mécanique alternative ou à ruban, les tours horizontaux ou verticaux sur lesquels sont montés des outils classiques de tronçonnage qu'il s'agisse de pièces en fonte grise, en acier ou en alliage cuivreux. Il en est de même pour les pièces coulées en acier inoxydable qu'il est impossible de découper au chalumeau découpeur ordinaire.

Nouveaux procédés de démasselottage

Deux procédés appliqués récemment ont mis à profit la facilité et la rapidité d'obtention de la fusion avec le chalumeau oxyacétylénique ou avec l'arc électrique et la simplicité des appareillages nécessaires :

— *Chalumeau à poudre :* outre le bec qui reçoit l'hydrogène et l'oxygène pour former le dard, ce chalumeau possède une tubulure par laquelle un jet de poudre de fer (comparable à celle utilisée pour les microphones de téléphone) est envoyé sous pression d'air comprimé, exactement à l'impact du dard du chalumeau et de la pièce lorsque la fusion de l'alliage est amorcée. Cette poudre joue un rôle double : d'une part, elle grenaille la partie fondue de la pièce et chasse les produits formés par l'oxydation des éléments de l'alliage qui isolent les parties sous-jacentes de l'action de l'oxygène, d'autre part, elle brûle elle-même et apporte un appoint de chaleur qui accélère la fusion.

— *Arc électrique et air comprimé :* un arc électrique est établi entre la pièce et une électrode en graphite recouvert de cuivre. L'alliage fond exactement à l'emplacement désiré. La pince de l'électrode est creuse et se termine par une tuyère qui dirige un jet d'air comprimé sous l'arc de telle sorte que le métal fondu est chassé au fur et à mesure qu'il fond. La saignée obtenue, légèrement plus large que le diamètre de l'électrode utilisée, permet de détacher commodément la masselotte de la pièce (le procédé est désigné commercialement sous le nom d'« Arcair »).

À l'aide de ces deux procédés, il est possible de découper des pièces en acier inoxydable, en fonte, de même que des pièces en acier ordinaire de très fortes sections pour lesquelles il était impossible d'avoir recours au chalumeau découpeur ordinaire. Les opérations qui consistent à détacher les jets de coulée, les évents et les masselottes à l'aide d'un chalumeau découpeur ordinaire, d'un chalumeau à poudre ou d'un arc électrique aidé d'air comprimé sont désignées sous le vocable général de « découpage ».

8.4.2. Ébarbage. — Les pièces débarrassées de leurs accessoires de coulée ou d'alimentation (jets, évents et masselottes) possèdent des excédents de matière, sortes de moignons qui les reliaient à ces évents, masselottes et coulées. On les fait disparaître à la lime, au burin, à la scie, à la meule à main ou à la meule montée sur bâti fixe et quelquefois par l'usinage lui-même. Cette opération est désignée sous le nom d'« ébarbage ».

Le burin est, quelquefois monté sur un appareil pneumatique dont il reçoit des secousses rapides qui accélèrent la coupe.

Les meules montées sur bâtis fixes, sont utilisées pour l'ébarbage des pièces dont la masse et l'encombrement permettent la manutention manuelle. Elles sont constituées de grains d'abrasifs (corindon ou crystolon) de granulométrie et de dureté variant selon l'application envisagée, agglomérés au silicate de soude pour les faibles vitesses de rotation, ou à la résine (bakélite le plus souvent) lorsque des vitesses voisines de 80 m/s sont requises pour atteindre un très grand rendement.

8.5. Réparation des pièces de fonderie. — Le but de la réparation est de rendre aux pièces l'ensemble des qualités d'aspect et de santé exigées par le client.

Cependant, dans tous les cas, la réparation ne doit être entreprise qu'après accord avec le client.

La soudure oxyacétylénique et à l'arc électrique sont couramment admises et pratiquées pour réparer les pièces d'acier.

Dans le cas de réparation de pièces en fonte grise, ces deux processus posent quelques problèmes, par suite des difficultés qui risquent de surgir ultérieurement au moment de l'usinage des pièces réparées.

La soudure de la fonte nécessite un préchauffage préalable des pièces à une température comprise entre 700 °C et 725 °C, et requiert une grande habilité professionnelle de la part de l'opérateur.

La soudure à la poche est quelquefois utilisée pour la réparation des pièces de grandes dimensions en fonte : elle consiste à faire couler sur la partie à réparer une quantité suffisante de fonte liquide, de même composition chimique que la pièce, de façon à obtenir une soudure parfaite. Après refroidissement, la partie réparée est ébarbée, meulée et façonnée de manière à lui redonner la forme de la pièce initiale.

Cette réparation ne se justifie que si le remplacement de la pièce défectueuse s'avère trop onéreux ou lorsque le délai de livraison dépasse largement la date fixée par le client. Elle exige une très grande expérience pour déterminer la quantité de fonte liquide à mettre en œuvre pour réussir la soudure.

La soudure à la torche est admise par de nombreuses administrations pour la réparation de pièces en alliages cuivreux. Elle consiste à faire éclater un arc électrique entre une électrode en graphite et la pièce dans la région de la partie à réparer puis d'effectuer la soudure à l'aide de baguettes d'apport en alliage de même composition chimique que la pièce à réparer. L'atmosphère réductrice qui se forme autour de l'arc électrique évite l'altération des éléments oxydables de la pièce et des baguettes d'apport.

Les alliages d'aluminium peuvent être réparés par soudure oxyacétylénique : le réglage du chalumeau est un peu différent de celui utilisé pour les autres alliages et la soudure proprement dite nécessite un tour de main assez facile à acquérir.

CHAPITRE II

MÉTALLURGIE DES POUDRES

1. GÉNÉRALITÉS

Dans la métallurgie des poudres, la compression des grains des différentes poudres mélangées intimement donne des pièces dont la résistance est moyenne mais insuffisante pour que ces pièces puissent être utilisées dans cet état. Cette résistance est considérablement améliorée par *frittage*.

Le frittage des poudres est un procédé d'agglomération qui, selon les archéologues, remonte à la période des Hittites (2 000 ans avant J.-C.) établis en Anatolie. À cette époque, les températures obtenues par la combustion naturelle du bois ou du charbon de bois n'étaient pas suffisamment élevées pour permettre la fusion du fer (1 535 °C) : le minerai était réduit en poudre à l'état solide et les grains de fer ainsi obtenus étaient ensuite agglomérés par frittage.

Selon Oppermann, la loupe de fer est historiquement le plus ancien des produits frittés. Une de ces loupes avait la composition chimique suivante :

O_2 = 2,28 %	Mn : traces	Ti O_2 = 0,24 %
C = 0,30 %	P : 0,015 %	V_2O_5 = 0,15 %
Si = 1,50 %	S : 0,015 %	Fe = 95,5 %

Le frittage a été utilisé par les anciens métallurgistes hindous et l'un des vestiges les plus importants de cette technique est la colonne de fer de Delhi, datant du IVe siècle de notre ère. Elle mesure 7,25 m de hauteur, 0,40 m de diamètre et sa masse dépasse six tonnes. Elle doit sa remarquable conservation à l'atmosphère de la région, particulièrement exempte d'humidité.

Les Incas obtenaient leurs bijoux en or et en platine également par frittage. D'ailleurs, tant que les températures élevées n'ont pu être atteintes à l'aide des combustibles et des méthodes de chauffage utilisés aux différentes époques de la civilisation, seul le frittage permettait d'agglomérer les poudres de métaux à points de fusion élevés : le platine (température de fusion : 1 772 °C) était encore aggloméré par frittage jusqu'au début du XIXe siècle, le molybdène (température de fusion : 2 617 °C) et le tungstène (température de fusion : 3 410 °C) jusqu'au début du XXe siècle.

1.1. Le frittage.

— Alors qu'en métallurgie et en fonderie les éléments sont fondus ensemble pour constituer l'alliage (coulé dans un moule, il prend la forme de l'empreinte et la conserve après solidification), dans la métallurgie des poudres, le mélange des éléments finement pulvérisés est fait à froid et dans des proportions souvent très éloignées de la composition chimique des alliages classiques (parfois même, le mélange réunit des éléments non miscibles ou non métalliques, qui ne permettraient pas d'obtenir un alliage par fusion). Par chauffage à une température inférieure à celle de fusion, la poudre est ensuite agglomérée par frittage.

Cette technique s'applique à une grande variété de poudres d'origines et de qualités diverses, certaines non métalliques, dont les propriétés physico-chimiques sont souvent très différentes. Elle met en œuvre les propriétés physiques caractéristiques présentées par les matières solides finement pulvérisées.

Le frittage comprend deux phases :

1° *la réalisation de la forme désirée*, avec des tolérances dimensionnelles très serrées, par compression à froid du mélange des poudres ; cela provoque l'imbrication des grains de différentes natures ;

2° *l'agglomération des grains comprimés :* elle est obtenue par chauffage à une température relativement basse, toujours inférieure à la température de fusion ; cela provoque le phénomène de frittage. Il se produit généralement un retrait notable au cours du frittage qui fait perdre, en partie, la précision dimensionnelle obtenue après la mise en forme par compression.

Compressibilité des poudres : les poudres sont d'autant plus compressibles qu'elles ont été mieux réduites. L'écrouissage diminue sensiblement la compressibilité des poudres (de fer en particulier). La densité apparente des poudres n'a pas de rapport direct avec leur compressibilité ; cependant, en général, pour des formes de grains identiques, la poudre à densité apparente la plus faible donne, une fois agglomérée, la densité la plus élevée. De plus, pour les poudres à densité apparente élevée, le mélange tout venant a une meilleure compressibilité qu'une partie des grains de cette poudre sélectionnés par tamisage ; parmi ceux-ci, ce sont les grains les plus gros qui se compriment le mieux.

1.2. Avantages des pièces frittées par rapport aux pièces coulées.

— Le frittage :

— supprime :

- la fusion, la perte au feu qui en résulte et ses frais élevés ;
- la coulée, les jets, les évents et les masselottes qu'une pièce coulée nécessite ;
- l'ébarbage avec les pertes de matière qu'il provoque ;
- l'usinage éventuel et son prix de revient élevé ;

— permet de créer des mélanges synthétiques d'éléments qu'il serait impossible d'obtenir par fusion ;

— simplifie les opérations et permet de réduire le prix de revient en rendant la fabrication automatique ;

— se prête parfaitement aux fabrications en grande série ;

— permet d'obtenir des pièces dont les caractéristiques mécaniques (résistance à la rupture par traction et allongement) sont très voisines de celles des alliages de compositions chimiques approchantes.

1.3. Inconvénients.

— Le frittage est limité à la fabrication de pièces de formes géométriques simples et il nécessite des investissements relativement élevés.

2. PROCÉDÉS DE FABRICATION DES POUDRES

Il s'agit de produire, à des prix aussi compétitifs que possible, des quantités importantes de poudres diverses, dont les qualités physico-chimiques répondent aux spécifications techniques fixées par l'utilisateur.

Les différentes méthodes de fabrication utilisées peuvent être classées en deux groupes : les procédés mécaniques et les procédés physico-chimiques.

2.1. Procédés mécaniques

2.1.1. Broyage. — Les métaux durs et fragiles mais peu ductiles comme le manganèse, le chrome, le bismuth, etc., peuvent être pulvérisés dans des broyeurs à boulets ou à marteaux, alors que les métaux mous et ductiles s'agglomèrent et ne permettent pas d'obtenir de la poudre.

2.1.2. Pulvérisation d'un métal liquide. — Un filet de métal liquide est soumis à l'action d'un jet violent d'un fluide fortement comprimé (air, azote, argon ou vapeur d'eau). L'étain, le zinc, le cadmium, le cuivre, l'aluminium, les bronzes et les laitons sont pulvérisés en utilisant cette méthode.

Pour le bronze au plomb à haute teneur, le procédé est particulièrement intéressant car le refroidissement instantané des gouttelettes évite la liquation du plomb, de sorte que la macrocomposition des grains est d'une grande homogénéité. Le frittage ultérieur n'altère pas cette homogénéité.

La pulvérisation d'un filet de métal liquide par un disque à palettes tournant à grande vitesse est à peu près abandonnée actuellement.

2.2. Procédés physico-chimiques

1° *Réduction d'oxydes métalliques finement pulvérisés.* — Les oxydes métalliques, généralement fragiles, peuvent être finement pulvérisés et la granulométrie finale de la poudre obtenue dépend de celle de la poudre d'oxyde utilisée. On réduit l'oxyde par le coke, l'anthracite ou un gaz réducteur (CO, H_2, ammoniac craqué, hydrocarbures, etc.) à une température inférieure à celle de fusion du métal. Pour le fer, on utilise l'oxyde des battitures ou le minerai suédois ; pour le cuivre, on utilise les résidus oxydés provenant de la métallurgie du cuivre ; pour le nickel, le cobalt, le tungstène et le molybdène, les oxydes sont réduits par l'hydrogène. On obtient des poudres, très fines pour les alliages durs.

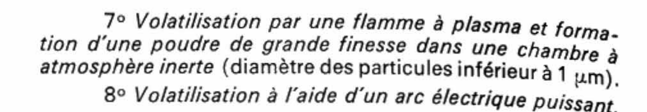
2° *Électrolyse.* — L'électrolyse de solutions salines de fer, de cuivre, de plomb, d'étain et de cobalt donne des poudres d'une très grande pureté. Il faut utiliser un courant de forte intensité, un électrolyte à température et à concentration acide élevées et pauvre en ions métalliques.

3° *Décomposition thermique des composés carbonyles.* — Ce procédé est utilisé pour le fer et le nickel.

4° *Broyage par un jet de gaz à vitesse supersonique.* — Cette technique est appliquée à des métaux fragiles et ductiles (procédé Coldstream).

5° *Réduction en phase vapeur des chlorures et des fluorures.*

6° *Évaporation et condensation sous vide.* — Les métaux les plus réfractaires sont volatilisés par bombardement électronique.



7° *Volatilisation par une flamme à plasma et formation d'une poudre de grande finesse dans une chambre à atmosphère inerte* (diamètre des particules inférieur à 1 µm).

8° *Volatilisation à l'aide d'un arc électrique puissant.*

3. FORMAGE PAR COMPRESSION À FROID DES MÉLANGES DE POUDRES

La cohésion de la pièce est obtenue par :

— soudure à froid (pour la plus grande partie) ;

— glissement réciproque des grains pour provoquer la rupture du film d'oxyde ou du film gazeux ;

— feutrage ou imbrication mécanique des grains déformés ;

— échauffement local par frottement, pour obtenir une soudure à chaud.

3.1. Équipement. — Il est nécessaire d'utiliser des presses très puissantes (jusqu'à 10 . 10^6 daN) qui permettent d'obtenir des pressions très élevées (entre 1 et 10 kbar) dans des matrices métalliques revêtues intérieurement de carbure de tungstène et très soigneusement polies. Le jeu entre le piston et le cylindre est compris entre 5 et 25 µm afin de permettre l'évacuation de l'air de la poudre pendant la compression.

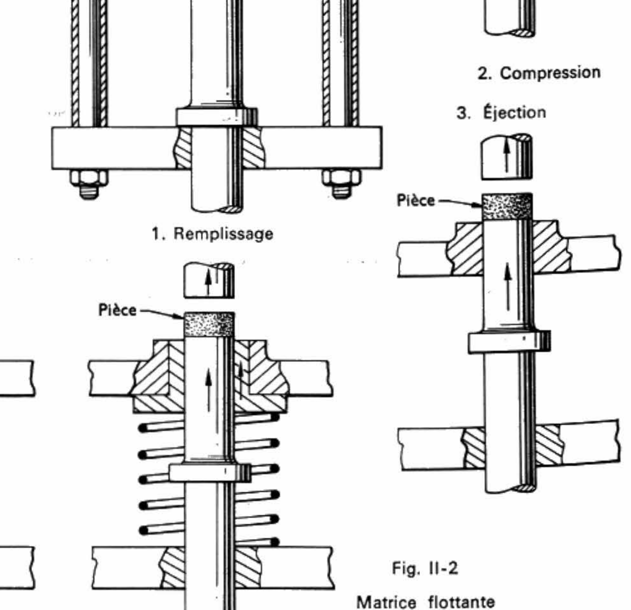
3.2. Production. — La production peut atteindre deux milles pièces à l'heure. La durée en service de la matrice peut dépasser deux millions de pièces. L'adjonction d'un lubrifiant au mélange de poudres permet quelquefois de réduire au tiers et même au cinquième la pression nécessaire à l'agglomération ; on utilise de la cire, de la paraffine, de la matière plastique, du stéarate de zinc ou de l'acide stéarique, à raison de 0,5 % environ.

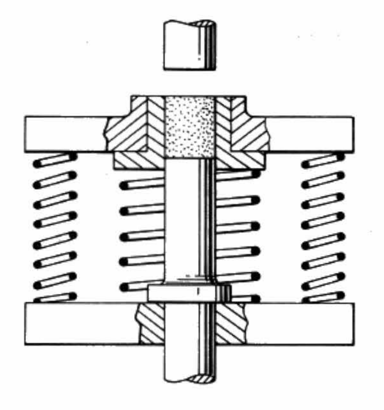
4. PROCÉDÉS DE MISE EN FORME

Pour la mise en forme, on emploie plusieurs procédés :

— *La compression simple :* elle s'applique à la métallurgie des poudres conventionnelles et elle permet d'atteindre des diamètres de pièces de 250 mm et une masse de 5 kg ; les outillages peuvent être simples ou à poinçons multiples à mouvements indépendants, à matrice flottante, etc. (fig. II-1, II-2 et II-3).

Fig. II-1





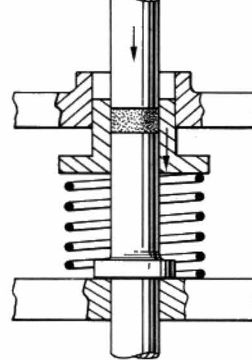
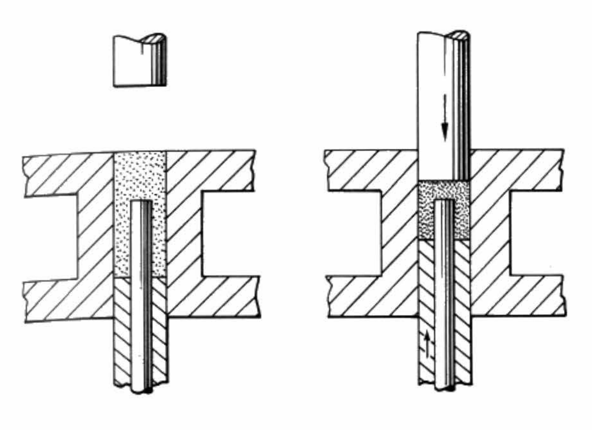


Fig. II-2

Matrice flottante



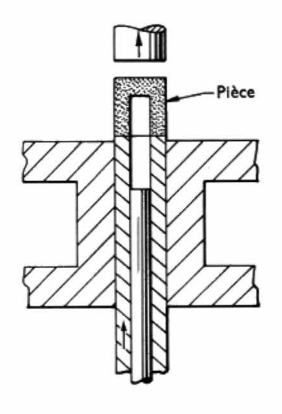


Fig. II-3

Matrice à pistons multiples

— *La compression isostatique à froid :* elle permet d'obtenir des tubes, des gaines ou des lingots cylindriques de grandes dimensions.

— *La compression isostatique à chaud :* elle est utilisée pour la fabrication de lingots ; la poudre est placée dans un conteneur et comprimée à froid isostatiquement sous une pression de 4 kbar. Le conteneur est ensuite scellé sous vide puis porté à une température de 1 100 °C, une pression de 1 kbar étant appliquée, par l'intermédiaire d'argon, dans l'enceinte de l'installation. Cette technique, mise au point en Suède, permet d'obtenir des lingots frittés à structure fine et homogène, sans défaut ni porosité. En revanche, le procédé est lent et onéreux.

— *La compression et la vibration combinées :* ce procédé permet de réduire le temps et la pression nécessaires à l'agglomération.

— *La compression en utilisant un explosif.*

— *Le formage électromagnétique :* la décharge d'une batterie de condensateurs dans une bobine en fil de cuivre de gros diamètre crée un champ magnétique très rapidement variable ; les courants induits dans un tube en cuivre placé à l'intérieur de la bobine développent des forces de Laplace qui déforment le tube (réduction du diamètre) et qui compriment sous une pression de plusieurs kilobars le mélange de poudres contenu dans ce tube.

— *Le laminage des poudres :* ce procédé est déjà utilisé industriellement et la production de tôles d'acier de haute qualité est techniquement au point. Elle permet de réaliser une économie sensible de matière première car le laminage de lingots coulés s'accompagne d'une *mise au mille* (masse de métal nécessaire pour fabriquer 1 t de tôle dépassant 1,300 t).

— *La compression et l'extrusion à chaud :* la compression dans des matrices, à des températures comprises entre 700 et 1 100 °C, est quelquefois réalisée sous vide pour des métaux réactifs, tels que le béryllium. Les profilés sont obtenus par extrusion à chaud.

— *La coulée en barbotine :* elle permet l'obtention de formes spéciales telles que creusets et pièces minces creuses.

— *La centrifugation* (ou la projection de poudre) dans une forme creuse en rotation : elle est utilisée pour réaliser des creusets et des tubes.

— *L'extrusion de pâte :* elle est employée pour fabriquer des tubes, des barres ou des profilés.

— *Le forgeage ou le calibrage :* ils permettent le formage à chaud de pièces frittées.

5. FRITTAGE

Après démoulage à froid, les pièces en poudres comprimées subissent l'opération de frittage qui permet d'améliorer leur résistance mécanique.

— *Principe du frittage :* les pièces sont placées dans un four, généralement continu et à atmosphère neutre ou réductrice, plus rarement sous vide, et elles sont portées à une température toujours inférieure à la température de fusion de la poudre.

— *Temps de frittage :* le temps de frittage est d'autant plus court que la température de frittage est plus voisine de la température de fusion. Pratiquement, la durée du frittage est comprise entre 15 mn et 2 h (il faut éviter un grossissement exagéré du grain).

— *Atmosphère du four :* l'atmosphère doit être neutre ou réductrice et parfaitement sèche. Une atmosphère réductive favorise le frittage en réduisant ou en supprimant la pellicule d'oxyde qui recouvre les grains.

On peut utiliser des gaz :

— exothermiques et riches en azote mais leur pouvoir réducteur est faible ;

— endothermiques et riches en hydrogène ou en oxyde de carbone, dont leur pouvoir réducteur est plus élevé.

Dans le cas de frittage de poudres de fer, le *pouvoir carburant* ou *décarburant* de l'atmosphère du four a une importance primordiale : on l'appelle le *potentiel de carbone;* il dépend de la teneur en gaz carbonique ou en eau de cette atmosphère.

5.1. Frittage des mélanges de poudres de plusieurs métaux

5.1.1. Métaux non miscibles. — Pour le frittage, il faut utiliser des poudres de même granulométrie.

5.1.2. Métaux miscibles. — Ils sont susceptibles de former des solutions solides (cas du cuivre et du nickel, par exemple) ou des composés définis, par diffusion réciproque entre les grains contigus de métaux différents : cette diffusion, d'ailleurs assez lente, risque de détruire l'homogénéité, aussi faut-il utiliser des poudres très fines et intimement mélangées. De plus, la température et la durée du frittage doivent être convenablement choisies.

5.2. Frittage en présence d'une phase liquide

5.2.1. Structure d'équilibre homogène. — La phase liquide apparaît d'une manière transitoire.

Exemple : Cas du cuivre et de l'étain (températures de fusion : 1 083 °C et 232 °C). La température de frittage est voisine de 800 °C. L'étain fond et recouvre les grains de cuivre. À partir de 500 °C il y a diffusion de l'étain dans le cuivre pour donner du bronze.

5.2.2. Structure d'équilibre hétérogène. — La phase liquide subsiste pendant toute la durée du frittage.

Exemple : Cas du carbure de tungstène et du cobalt. La température de frittage est comprise entre 1 350 et 1 500 °C (température de fusion du cobalt : 1 495 °C, température de fusion de l'eutectique tungstène-cobalt : 1 280 °C) ; le cobalt s'allie à 35 % de tungstène pour former l'eutectique, puis la quantité de cobalt dissoute augmente avec la température et le volume de la phase liquide s'accroît. Au refroidissement, le carbure précipite dans la phase liquide qui atteint la concentration eutectique et se solidifie à 1 280 °C. On observe un retrait linéaire très important, voisin de 20 %.

5.3. Frittage sous pression ou compression à chaud. — Le chauffage est réalisé par des moyens électriques (chauffage par résistance, chauffage par induction

à haute fréquence) et sa durée doit être choisie avec précision. La compression peut avoir lieu :

— à haute température (comprise entre 1 500 et 2 500 °C) : cela nécessite des matrices en graphite éventuellement revêtues d'oxydes. La pression peut atteindre 300 bars.

— à température moyenne (comprise entre 800 et 1 100 °C) : les matrices sont alors en alliages réfractaires.

6. FOURS DE FRITTAGE

Les fours de frittage doivent répondre aux critères suivants :

— Ils doivent assurer une température rigoureusement uniforme pour toutes les pièces traitées suivant le cycle thermique adopté.

— Ils doivent être conçus pour éviter toute oxydation ou action chimique pendant la durée du frittage.

— Ils doivent être établis de façon à permettre le défournement des pièces après refroidissement complet.

Les fours de frittage sont chauffés généralement à l'électricité. Ils sont continus et à atmosphère contrôlée ; le cycle thermique est réglé automatiquement.

Résistances électriques :

— pour une température inférieure à 1 150 °C, les résistances sont en alliage nichrome ou en kenthal ; la sole mobile est, le plus fréquemment, à tablier ;

— pour une température supérieure à 1 150 °C, les résistances sont en carbure de silicium, en carbone ou en molybdène ; ce sont des fours poussants.

L'atmosphère est obtenue par combustion incomplète de gaz séché et épuré, d'ammoniac craqué ou d'hydrogène sec.

7. FINITION DES PIÈCES FRITTÉES

Les pièces frittées peuvent subir un retrait important variant de 2 à 20 % environ. Elles sont alors matricées ou usinées pour leur redonner les formes et les dimensions requises.

7.1. Traitement thermique. — Suivant la pièce et suivant la composition chimique des poudres utilisées il peut être nécessaire d'exécuter un traitement thermique qui consiste généralement :

— soit en une trempe martensitique ;

— soit en un traitement de durcissement par précipitation structurale ;

— soit en un revenu ou un recuit.

7.2. Traitement superficiel. — Les pièces frittées, sous certaines conditions, peuvent subir un traitement superficiel par réaction gazeuse (carbonitruration ou cémentation), ou recevoir un revêtement de surface (shérardisation ou chromisation).

Si le traitement de surface est effectué dans un bain de sel ou dans une solution aqueuse, il est nécessaire d'obturer les pores au préalable à l'aide de résine, par exemple, afin d'éviter la pénétration du liquide qui pourrait provoquer une corrosion interne progressive.

8. APPLICATIONS

La métallurgie des poudres permet de fabriquer des pièces lorsque les procédés de la métallurgie classique ne peuvent être utilisés, par suite notamment :

— d'une température de fusion trop élevée donc trop onéreuse ;

— de l'inter-réaction du métal et du réfractaire du four de fusion qui augmente la perte au feu ;

— de la solubilité trop importante des gaz dans le métal liquide (H_2 et CO notamment) ;

— de la perte importante de métal que représentent les attaques de coulée, les évents et les masselottes nécessaires pour assurer la santé de la pièce en fonderie.

Cette fabrication s'applique tout particulièrement à certains métaux et alliages.

8.1. Métaux et alliages utilisés

8.1.1. Les métaux réfractaires et leurs alliages (tungstène, molybdène, tantale, niobium, rhénium, etc.). — Les poudres de tungstène et de molybdène sont obtenues par réduction de leurs oxydes par l'hydrogène. Les mélanges de poudres sont comprimés à froid puis, après frittage, entre 1 200 et 1 400 °C dans une atmosphère d'hydrogène, les barreaux frittés sont portés à une température voisine du point de fusion par effet Joule. Ils sont martelés à chaud entre 1 500 et 1 700 °C et ensuite laminés ou tréfilés. Les produits obtenus sont utilisés dans l'industrie des lampes et, pour le platine, en bijouterie et en pyrométrie.

8.1.2. Les métaux nucléaires. — Alors que l'uranium, le zirconium, le thorium et leurs alliages sont obtenus généralement par fusion, leurs déchets sont récupérés, transformés en poudre par broyage ou par l'intermédiaire d'hydrures, puis frittés.

8.1.3. Les alliages magnétiques. — Les alliages nickel-cobalt-aluminium sont obtenus par fusion et par frittage. Le frittage est appliqué surtout pour la fabrication des petits aimants pour lesquels le moulage serait trop onéreux. De nombreux aimants sont obtenus à partir de mélanges de poudres de manganèse, d'aluminium, de platine et de cobalt (ou de manganèse, de bismuth, de fer et de cobalt) ; les ferrites sont obtenues à partir de poudres de Fe_2O_3 (56 %) et de CoO (44 %) ; les alnico agglomérés à la résine et les aimants vectolites à partir de poudres de Fe_2O_3 (30 %), de Fe_3O_4 (44 %) et de Co_2O_3 (26 %).

Depuis longtemps déjà les pièces polaires ou les noyaux magnétiques sont obtenus par frittage car il n'y a pas d'usinage ultérieur ni de perte de métal (coulées, évents, masselottes).

Leurs propriétés magnétiques et leur perméabilité sont légèrement inférieures à celles des pièces coulées par suite de la porosité des pièces frittées. Cependant, en partant de poudres à degré de pureté élevé et très compressibles on obtient, avec une densité élevée, des pièces très largement employées :

— en flux magnétique continu : inducteurs, pièces polaires, noyaux de relais, etc. ;

— en flux alternatif à 50 Hz, en revanche, les pièces massives frittées ne peuvent concurrencer l'empilage des tôles minces. Les pièces minces frittées ($e = 1$ à 2 mm) en fer-silicium (6,5 % de Si) ou en fer-nickel-molybdène (47 % de Ni et 3 % de Mo), dont les pertes totales sont acceptables, permettent un fonctionnement satisfaisant.

8.1.4. Les alliages à propriétés spéciales. — Les alliages fer-nickel-cobalt, dans la technique du vide et la soudure au verre, exigent une grande pureté et une composition chimique précise. Ils sont élaborés sous vide.

Les semiconducteurs (tellure-bismuth, par exemple) sont fréquemment frittés.

Les alliages lourds (tungstène-nickel-cuivre ou tungstène-nickel-fer), contenant de 90 à 96 % de tungstène suivant la densité exigée (17 à 18,5), trouvent des applications comme masse de gyroscopes (pour leur densité élevée) et comme écrans antiradiations (pour leur pouvoir absorbant élevé du rayonnement γ : 1,4 fois celui du plomb). Le liant fer-nickel présente une résistance mécanique élevée ($R_t > 90$ daN/mm² et $A = 7$ à 10 %).

Les alliages tungstène-cuivre sont utilisés comme contacts électriques et donnent des électrodes résistant à l'usure dans la technique d'usinage par électro-érosion.

8.2. Produits poreux. — La technique des poudres frittées à permis d'obtenir des pièces comportant des pores très fins, très uniformément répartis et communiquant entre eux, dont les exemples d'applications sont très divers.

8.2.1. Coussinets autolubrifiants. — Le volume des pores peut atteindre 30 % du volume total. Ils sont imprégnés d'huile après passage dans une enceinte sous vide : le coussinet dispose d'une réserve d'huile suffisante pour assurer le graissage pendant la vie entière de l'appareil.

Cette application est en constante expansion pour les coussinets des appareils ménagers, des accessoires et des petits appareillages d'automobiles. De nombreuses améliorations ont permis de quintupler leurs performances.

8.2.2. Filtres métalliques frittés. — Le frittage de poudres, à granulométrie très concentrée $\left(\frac{d\ \max}{d\ \min} \leqslant 1{,}5\right)$ et faiblement comprimées, a permis d'obtenir un matériau à perméabilité très régulière dont le diamètre moyen des pores correspond au cinquième du diamètre minimal des grains et dont la porosité est comprise entre 35 et 40 %.

De nombreux alliages sont utilisés: bronzes, aciers inoxydables (18/10), nickel, aciers spéciaux à 25 % de chrome et 20 % de nickel, monel, Hastelloys, Inconel, etc.

Ils sont frittés sous forme de bandes ou de tubes. Ils présentent la même perméabilité que les filtres en papier; en outre ils possèdent l'avantage d'être rigides et réfractaires comme la céramique et d'être résistants aux chocs thermiques comme un métal.

Leurs applications sont très variées:

— éléments poreux de filtres à gaz, à liquides, à gaz et liquides, à liquides et solides;
— transport pneumatique;
— coupe-flamme, brûleurs;
— supports de catalyseurs, silencieux;
— électrodes poreuses de piles à combustible (en nickel);
— plaques d'accumulateurs (en nickel ou en argent poreux).

Bibliographie

R. Meyer: Société Ugine-Carbone; *« Journées d'études du 14 décembre 1970 G.A.M.I.-I.S.M.C.M. »*

FORMAGE MÉCANIQUE

CHAPITRE PREMIER

DÉCOUPAGE DES MÉTAUX

L'emploi de la tôle est en pleine expansion, car de multiples pièces qui étaient autrefois moulées ou forgées et nécessitaient des opérations d'usinage longues et coûteuses, sont remplacées par des pièces en tôles. Ainsi leur fabrication peut être réalisée d'une manière plus rationnelle et plus économique. Chaque pièce à produire nécessite la mise au point d'un outillage approprié qui permet une production en série de qualité constante.

Plateau-revolver d'une presse pour détourage en forme de deux parties constituant une boîte à pastilles (*E. W. Bliss*)



Dans le tableau suivant sont rassemblés quelques exemples d'utilisations de pièces en tôle.

Alimentation	Emballages métalliques, ouvre-boîtes, bouchons, fûts
Articles de bureau	Machines à écrire, machines comptables, meubles métalliques
Articles ménagers et appareils électroménagers	Réfrigérateurs, cuisinières électriques et à gaz, chauffe-eau, couverts, casseroles
Articles de Paris	Briquets, étuis à cigarettes, boîtes à poudre, étuis pour fards
Automobiles et cycles	Nombreuses pièces constituant le châssis, carrosserie
Électricité et radiotélévision	Châssis d'appareils radio, pièces diverses, tôles magnétiques
Habillement	Boutons-pressions, boucles de ceintures et de bretelles, boutons métalliques
Horlogerie	Boîtiers de montres, roues, aiguilles, platines de montres
Photographie, optique, cinéma	Bobines, châssis de plaques, nombreux éléments d'appareils
Quincaillerie et menuiserie métallique	Serrures, verrous, cadenas, charnières, menuiserie métallique

1. OPÉRATIONS RÉALISÉES SUR PRESSES (MÉCANIQUES OU HYDRAULIQUES)

Les opérations principales réalisées sur les presses sont :

— *Le découpage, le poinçonnage, le détourage* de feuilles, de bandes ou de flans.

— *L'emboutissage, les étirages successifs* et *l'étirage de paroi par laminage.*

L'emboutissage consiste en la transformation d'une tôle plane en un corps creux à l'aide d'une matrice annulaire dans laquelle pénètre un poinçon (l'outil est en général muni d'un presse-tôle) ; l'emboutissage est un travail de transformation de surface par déplacement moléculaire et non un travail d'allongement ou d'étirage du métal.

— *Le cambrage, le pliage, la frappe, le matriçage et l'estampage.*

Les travaux exécutés sur les presses sont souvent des opérations de reprise :

— **Sur des flans ou ébauches obtenus plans :** poinçonnage, ajoutages supplémentaires, soyage, encochage, gravure, estampage de tous motifs (lettres, chiffres) et arasage de précision de la surface découpée.

— **Sur des pièces cambrées :** mêmes opérations que celles énumérées ci-dessus à l'exception de l'arasage ; le détourage en forme d'ailes cambrées est souvent pratiqué.

— **Sur des pièces embouties** (ou en cours d'opérations d'emboutissage) : mêmes opérations que celles énumérées ci-dessus, à l'exception de l'arasage.

Ces pièces subissent presque toujours des opérations de détourage. En effet, celles-ci sont nécessaires pour l'obtention d'un corps creux à la profondeur fixée par le dessin de la pièce ou pour le découpage d'une collerette à la forme exacte ou encore pour des poinçonnages sur le fond et sur la douille.

1.1. Différents types d'outils.

— On distingue :

— les outils dont les éléments actifs sont guidés par des colonnes alignant la partie mobile et la partie fixe de l'outil ;

— les outils dont les éléments actifs sont guidés automatiquement par une plaque de guidage, montée au-dessus du couloir de bande, et qui sert également à l'extraction de tous les poinçons hors de la bande, lors de la remontée du coulisseau de la presse.

1.1.1. Outils pour découpage direct avec dévêtisseur-guide fixe. — Avec ces outils, après découpage, la pièce produite ainsi que les débouchures passent successivement à travers la matrice et la table de la presse. Ces outils sont les moins coûteux et leur capactié de production horaire est maximale.

Le terme **dévêtisseur-guide** s'explique par les deux fonctions de l'outil ; il est vulgarisé dans les bureaux d'étude d'outillage (dans les ateliers, cette pièce est souvent nommée contre-plaque).

1.1.2. Outils pour découpage direct avec dévêtisseur élastique. — Ce type d'outil comporte les mêmes éléments de coupe que les précédents mais, d'une part, on ne leur adjoint pas toujours un dispositif pour l'avancement automatique de la bande et, d'autre part, le dévêtisseur de bande est élastique c'est-à-dire soumis à la pression de ressorts, de rondelles élastiques, ou de tampons en caoutchouc que l'on interpose entre le dévêtisseur et la plaque porte-poinçons. Ce genre d'outil est souvent nommé « outil à découvert » du fait que les lignes de coupe sont visibles lorsque le coulisseau de la presse est en haut de course.

Les outils à dévêtisseur élastique sont utilisés pour le découpage de pièces minces, d'une épaisseur inférieure à 0,4 mm, car il est nécessaire d'empêcher la matière de se galber pendant l'opération ; dans ce cas, le dévêtisseur élastique joue le rôle de presse-bande.

Un dévêtisseur élastique est également nécessaire lorsque l'outil comporte des ajours très longs et très étroits ; certains poinçons fragiles peuvent se rompre si la bande est soulevée avant l'extraction des poinçons.

1.1.3. Outils composés. — La construction d'un outil dit « composé » s'impose lorsqu'on désire obtenir des pièces *dont les poinçonnages et ajourages doivent être en relation précise entre eux et avec le contour;* un outil composé produit une pièce terminée en une seule descente du coulisseau de la presse et avec des tolérances constantes (fig. I-1).

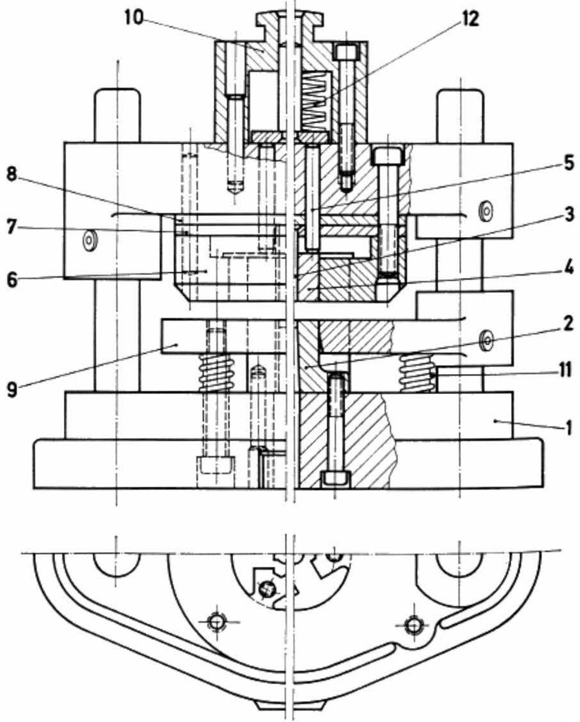
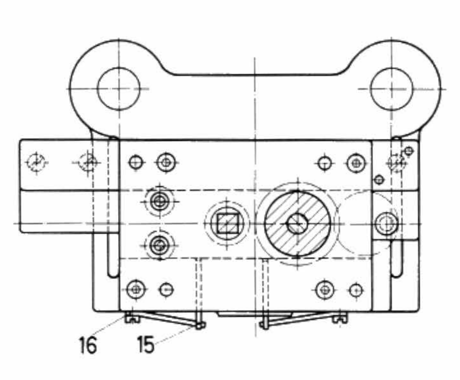


Fig. I-1 — Outil composé pour ajourage central et découpage simultané du contour d'un isolant. 1, bloc à colonnes ; 2, poinçon de découpage ; 3, poinçon de poinçonnage en forme ; 4, éjecteur ; 5, tige d'éjection ; 6, matrice ; 7, plaque porte-poinçon ; 8, plaque d'appui ; 9, dévêtisseur ; 10, nez de presse ; 11, ressort hélicoïdal ; 12, rondelles-ressorts (*Sustan*)



1. Bloc à colonnes
2. Plaque porte-matrice
3. Matrice
4. Matrice
5. Matrice
6. Poinçon de découpage
7. Poinçon de poinçonnage carré
8. Poinçon de poinçonnage
9. Plaque d'appui
10. Pilote
11. Butée de pas
12. Drageoir
13. Contre-plaque
14. Plaque porte-poinçon
15. Butée de départ
16. Lame de ressort
17. Nez de presse
18. Vis à tête cylindrique
19. Vis à tête cylindrique
20. Goupille cylindrique
21. Goupille cylindrique

Fig. I-2 — Outil progressif pour poinçonnage, ajourage central et découpage du contour, monté sur un bloc à colonnes situées à l'arrière (*Sustan*)

Dans ce cas, les bavures des trous, des ajours et du contour se trouvent sur la même face de la pièce ; c'est une considération très importante pour certaines pièces.

1.1.4. Outils progressifs. — On les utilise pour la fabrication en moyenne et en grande série de pièces nécessitant des poinçonnages, des ajourages, des encochages, des soyages, des parties crevées et également des formages. La bande subit une ou plusieurs des opérations citées et, à la dernière phase, la pièce est découpée ou détourée. Le profil de la pièce est réalisé progressivement, c'est-à-dire sur plusieurs empreintes (fig. I-2).

Il est important de noter qu'il n'est pas possible d'obtenir des pièces de haute précision sur des outils progressifs. Suivant les dimensions des pièces on admet des tolérances de plus ou moins 0,05 à 0,10 mm pour les bords du flan, les ajourages et les poinçonnages.

1.1.5. Outils de découpage en éléments assemblés. Dans le but d'éliminer les risques de déformation au traitement thermique et de permettre la construction de poinçons et de matrices de grand encombrement en toutes sections, on réalise ces outils en plusieurs éléments. Ainsi le remplacement d'une partie endommagée est facilité et l'usinage d'ouvertures de matrices étroites dans des matières épaisses est plus aisé. Ces outils de découpage sont souvent appelés **outils segmentés**.

1.1.6. Outils pour découpage fin. — Dans une opération de découpage conventionnel, seule une fraction de l'épaisseur de la matière est découpée (elle correspond à la longueur de la partie brunie) et le reste est plus ou moins déchiqueté. Au contraire, la technique du **découpage fin** (appellation allemande) permet d'obtenir des pièces de haute précision présentant des bords parfaitement à l'équerre et d'un état de surface de haute qualité.

Son principe est le suivant : par la descente d'un coulisseau presse-tôle d'une presse de construction spéciale, on imprime dans le métal un sillon autour du profil de la pièce à découper ; ensuite, un coulisseau central est descendu et il force le poinçon de découpage à travers la matière (fig. I-3). Une arête de retenue est usinée sur le presse-tôle (et parfois sur la face de la matrice) imprimant le sillon pour provoquer une transformation structurale durable de la matière pendant le découpage.

Dans le cas du découpage fin, la perte en métal est légèrement supérieure aux parois de la bande ainsi qu'à la paroi entre deux ouvertures de bande (une surface est nécessaire à l'impression du sillon de retenue).

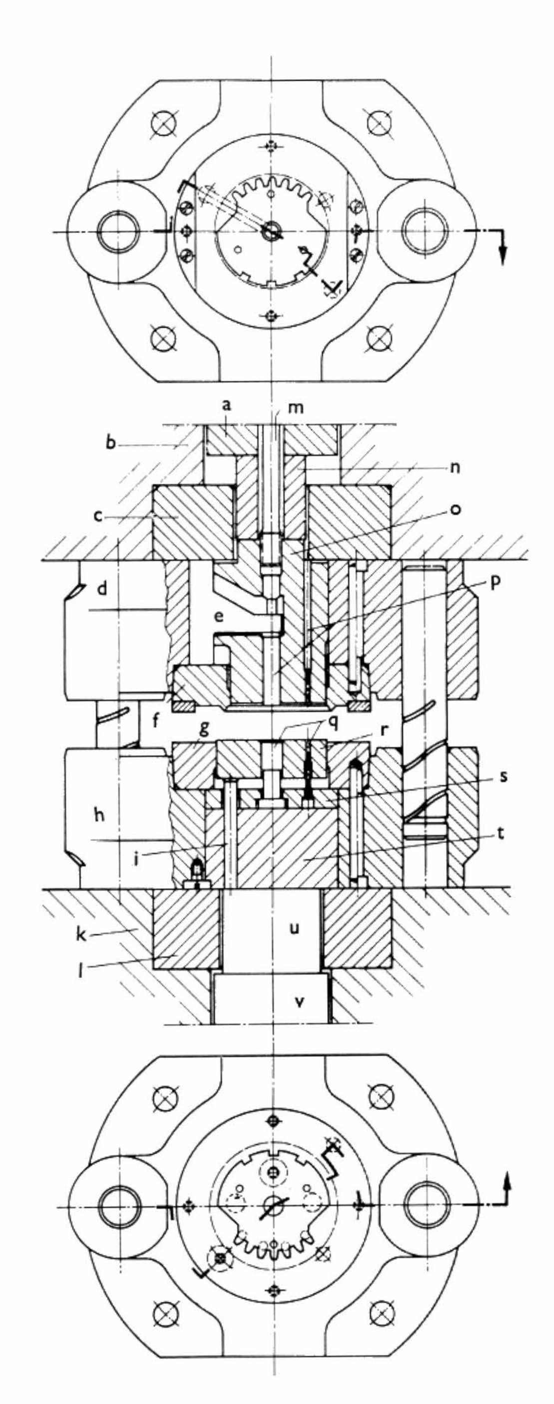
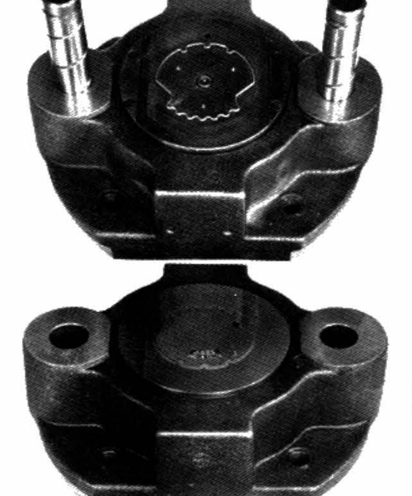


Fig. I-3 — Outil de découpage fin pour une rondelle partiellement dentée (⌀ extérieur 65 mm)
a, appui du poinçon ; b, coulisseau presse-flan ; c, anneau d'appui ; d, partie supérieure du bloc-outil ; e, appui de l'éjecteur de déchet ; f, presse-tôle ; g, matrice ; h, partie inférieure du bloc-outil ; i, chandelle ; k, coulisseau principal ; l, anneau d'appui ; m, fixation du poinçon principal ; n, anneau entretoise ; o, poinçon principal ; p, éjecteurs de déchets ; q, poinçons-perceurs ; r, éjecteur principal ; s, plaque porte-poinçon ; t, plaque d'appui ; u, plaque entretoise ; v, coulisseau éjecteur (*ESSA*)





Pièce partiellement découpée ; l'arrondi de découpe est bien visible sur l'extrémité de la denture (*ESSA*)

Outil de découpage fin du type « poinçon mobile » avec matrice, poinçon principal, presse-flan avec cordon de retenue, poussette de contre-pression utilisée également comme extracteur (*ESSA*)

Les outils de découpage fin doivent être de construction compacte et très rigide ; leur poids est donc supérieur à celui des outils conventionnels.

Remarque : Même microscopiques, les opérations de découpage produisent souvent des bavures. Pour une acceptation limite de bavures éventuelles les services de contrôle industriels définissent un coefficient de foisonnement pour les grandes séries. Il est établi d'après une méthode et des tolérances propres à chaque cas.

1.2. Différents types de presses. — Pour obtenir des résultats économiques, un grand nombre de conditions doit être rempli simultanément. Un choix précis doit être fait parmi les machines de production afin de définir exactement le matériel le plus approprié à chaque opération.

Nous ne mentionnons que pour mémoire les machines utilisées pour les premières opérations sur les métaux en feuilles, à savoir :

— *les cisailles à guillotine* qui permettent l'obtention de bandes ou des flans à partir de tôles de formats commerciaux ;

— *les cisailles à couteaux circulaires multiples*, qui sont des machines de grande production, le métal à cisailler se présentant sous forme de rouleaux.

1.2.1. Presses à bâti en col de cygne. — Ces machines sont employées pour tous les travaux de découpage, poinçonnage, ajourage, cambrage et emboutissage peu profonds. (fig. I-4). La forme du col de cygne permet une grande accessibilité à la zone de travail, mais elle nuit à la rigidité de l'ensemble ; cela rend difficile des découpages soignés avec des outils non guidés.

Les figures I-5 et I-6 illustrent une chaîne de fabrication semi-automatique sur trois presses à bâti en col de cygne. La flèche de la figure I-5, montre le transporteur à courroie (vu de profil sur la figure I-6) qui élève les ébauches à la hauteur de la servante de la machine effectuant l'opération suivante.

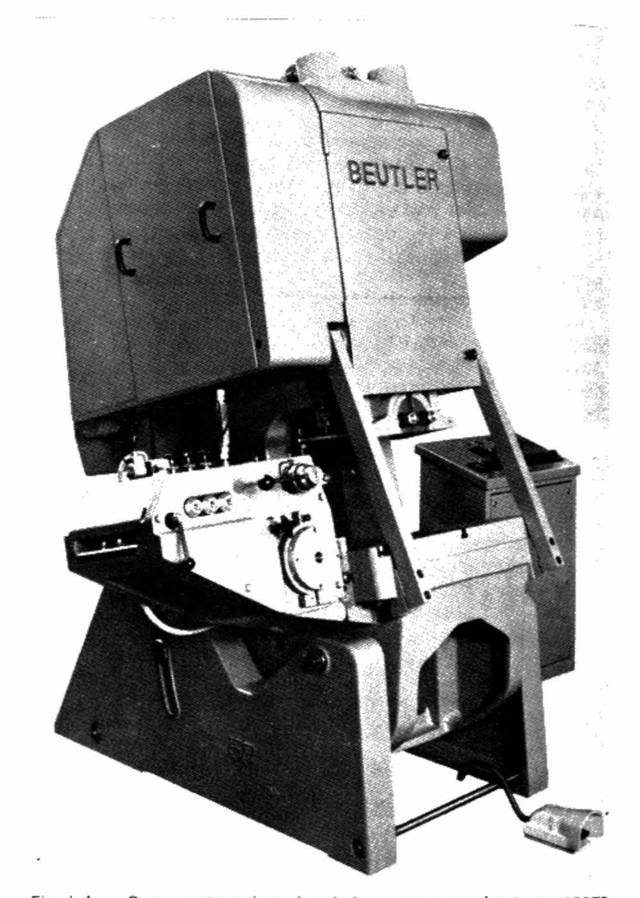


Fig. I-4 — Presse automatique à col de cygne avec tirants, amenage automatique à simple paire de rouleaux. Alimentation par redresseur commandé directement ; commande sur circuits imprimés (*Beutler*)

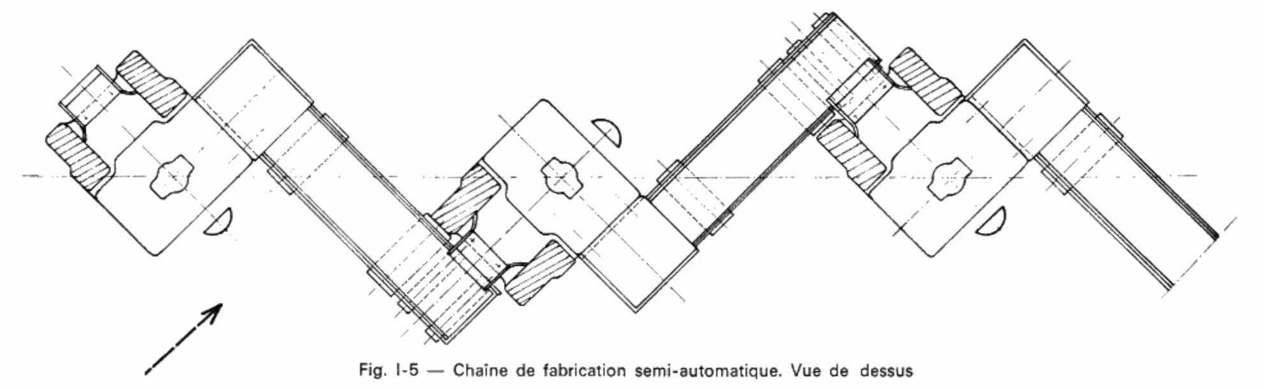


Fig. I-5 — Chaîne de fabrication semi-automatique. Vue de dessus

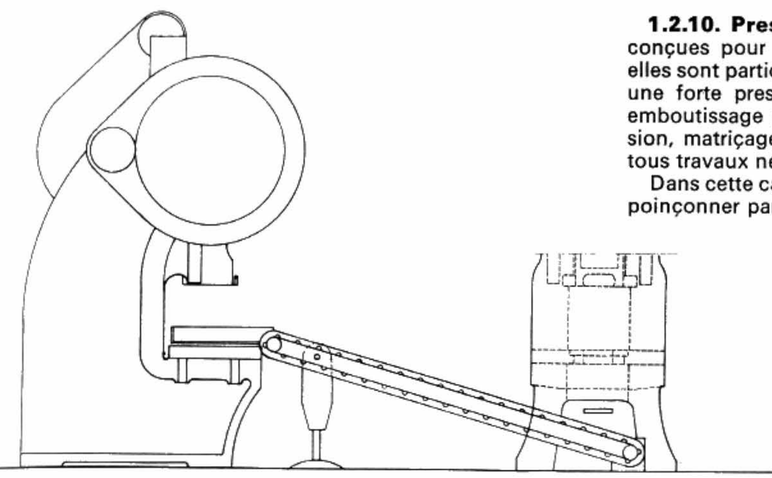


Fig. I-6
Transporteur à courroie. Vue de profil

1.2.2. Presses à bigorne. — L'outil est monté sur une bigorne et on peut alors présenter devant celui-ci des pièces dont la forme ou l'encombrement constitue un obstacle sur les presses à table fixe.

1.2.3. Presses à bâti en arcade. — Ces machines présentent une rigidité maximale. L'effort de réaction est supporté directement par les montants et il se traduit par un allongement rectiligne.

1.2.4. Presses à bâti assemblé. — Le bâti de ces machines, est assemblé, c'est-à-dire que la table, le chapiteau et les montants sont reliés par quatre tirants serrés à chaud. Ce sont les tirants qui supportent tous les efforts de traction et permettent un allongement rectiligne (fig. I-7).

1.2.5. Presses à double action. — Ces machines sont spécialement réservées à l'emboutissage. Un coulisseau portant le poinçon d'emboutissage est guidé dans un coulisseau presse-tôle, lequel est commandé par des genouillères ; ainsi la pression exercée est uniforme pendant la durée de l'emboutissage.

1.2.6. Presses à genouillères. — Ce genre de machine est employé pour des opérations de calibrage de pièces ayant subi plusieurs opérations de formage. On les emploie surtout en orfèvrerie et pour l'estampage de monnaies et médailles.

1.2.7. Presses de type inversé. — Contrairement aux presses conventionnelles, tous les organes de commande des presses de type inversé sont situés dans la partie inférieure de la machine. C'est par traction que le poinçon pénètre dans la tôle ; tous les jeux des surfaces circulaires en mouvement sont ainsi rattrapés. Cela évite le double coup existant sur tous les autres types de presses et qui est toujours néfaste aux poinçons et aux perforateurs de très faible section.

Les cadences de ces presses sont supérieures à celles de toutes les autres.

1.2.8. Presses de découpage fin. — Les presses construites sont, en général, à commande hydraulique, certaines sont munies d'une double genouillère qui actionne le presse-tôle et l'appareil de contre-pression. Les forces exercées sur l'outil sont 1,5 à 2,5 fois plus intenses que celles appliquées dans le découpage conventionnel. Même à pleine charge cette presse présente une rigidité exceptionnelle et permet des découpages de grande précision.

1.2.9. Presses-transfert. — Ces machines sont utilisées pour exécuter de multiples opérations à partir du métal en rouleau et réaliser des pièces dont l'encombrement ne permet pas le transport en bande.

Dans ce cas, le flan est découpé puis transporté aux postes successifs de transformation à l'aide de pinces réglables ; le mouvement longitudinal des lames porte-pinces est commandé par un dispositif à came à rotation continue ou par un dispositif hydraulique.

1.2.10. Presses hydrauliques. — Ces machines sont conçues pour un cycle, en simple ou en double action ; elles sont particulièrement adaptées aux travaux nécessitant une forte pression, exercée de façon continue, tels que : emboutissage profond, découpage fin, formage par extrusion, matriçage, formage à chaud, brochage, sertissage et tous travaux nécessitant un temps d'arrêt en bas de course.

Dans cette catégorie de presses il faut citer une machine à poinçonner particulière qui est parfois équipée d'une commande numérique : il s'agit de la *presse à tourelles*. Sur cette sorte de machine, les poinçons et les matrices sont placés sur deux tourelles circulaires montées sur les axes verticaux d'un bras supérieur et d'un bras inférieur d'un bâti en col de cygne à grande profondeur. Le poinçon et la matrice sélectionnés sont placés sous le coulisseau de la presse en faisant tourner les tourelles. Le dispositif de blocage des tourelles commande le mécanisme d'embrayage de sorte que la machine ne peut être mise en marche que lorsque les tourelles sont correctement placées et verrouillées.

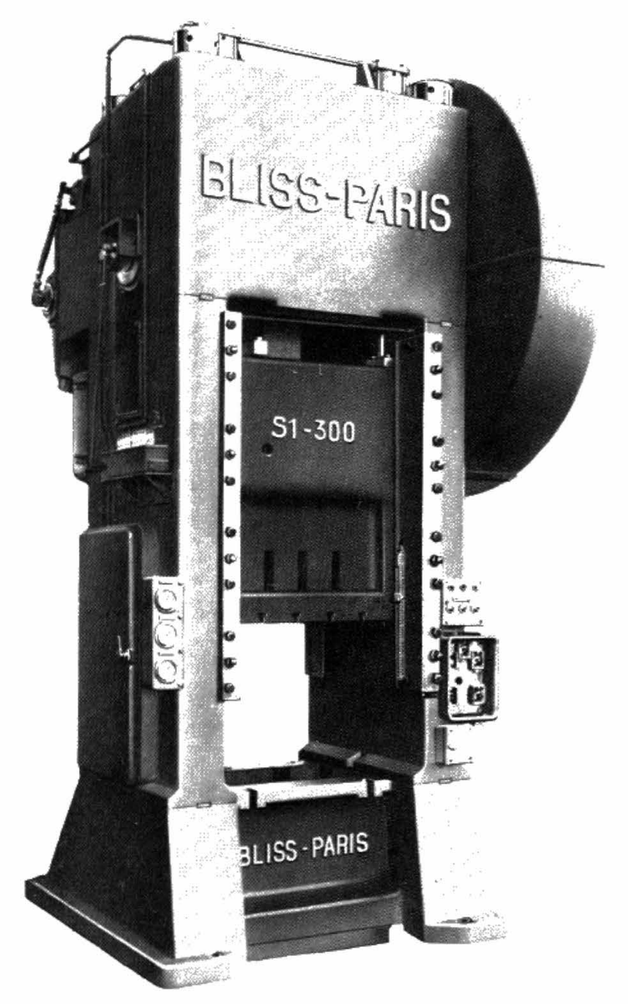


Fig. I-7 — Presse à bâti assemblé par quatre tirants et à long guidage de coulisseau (*E. W. Bliss*)

Les différents modèles comportent de 12 à 32 postes de poinçonnages. La mise en position des tôles est faite soit sur des tables à lecture directe, soit sur des tables à gabarit. Sur les grands modèles on peut poinçonner ou ajourer en pleine tôle des formats de 5 mètres sur 3 mètres.

1.3. Jeux de coupe. — Pour qu'une pièce puisse être correctement détachée d'une bande il est nécessaire de prévoir un jeu, fonction de la dureté de la matière et de l'épaisseur de celle-ci. Lorsque le jeu entre le poinçon et la matrice a une valeur convenable le côté écroui des bords de la pièce présente une partie lisse très grande et le reste a un aspect rugueux; des jeux inappropriés sont la cause de bavures et de déformations de la pièce (galbage) et ils imposent parfois d'exercer un effort plus important.

Ces considérations ne s'appliquent qu'à des outils conçus pour le découpage conventionnel; pour l'arasage et le « découpage fin », le jeu maximal admis est de 0,01 mm.

En fonctionnement normal, *les valeurs du jeu de coupe pour des formes circulaires* sont les suivantes :

— pour l'acier doux, l'acier semi-dur et le bronze laminé : 6 % de l'épaisseur ;
— pour les aciers durs : 7 % de l'épaisseur ;
— pour les aciers demi-durs d'une épaisseur supérieure à 5 mm : 10 % de l'épaisseur ;
— pour le laiton et les alliages d'aluminium : 5 % de l'épaisseur.

Les valeurs sont à diviser par deux pour définir le jeu par paroi dans le cas de formes irrégulières.

On emploie des matières dont la nuance et les tolérances sont normalisées car toute matière défectueuse impose souvent de multiples réglages, des opérations de reprise non prévues lors de l'établissement de la gamme de fabrication ainsi qu'un certain pourcentage de rebuts (ce qui modifie obligatoirement le prix de revient de la pièce obtenue).

Remarque : en tenant compte de leur coefficient d'écrouissage par poinçonnage les métaux peuvent être classés de la façon suivante :

Aciers inoxydables 18-8,
Laiton 65-35 recuit,
Aciers doux nuance SPD,
Cuivre recuit,
Aluminium nuances A3 et A4.

En tête de ce classement se trouvent les métaux dont l'écrouissage est le plus difficile.

1.4. Exemple de calcul de l'effort de découpage et du travail de la force. — L'intensité F de la force à exercer pour une opération de découpage est égale au produit du périmètre P du contour et des trous à poinçonner, de l'épaisseur e du matériel et de la charge de rupture à la traction (R_t) de celui-ci :

$$F = Pe R_t$$

On exprime F en décanewtons, P et e en millimètres, R_t en décanewtons par millimètre carré ou hectobars.

Le travail à fournir est égal au produit de la force F et du chemin parcouru par son point d'application.

Exemple : Découpage, en marche « continue », d'une pièce d'épaisseur 2 mm, le périmètre total à découper est de 180 mm et la charge de rupture par traction est de 38 daN/mm² pour le matériau employé.

1° *Effort de découpage :*

$F = 180 \times 2 \times 38 = 136\,800$ daN

2° *Travail de la force :*

$1\,368 \times 10^3 \times 0{,}002$ m $= 2\,736$ joules.

Force motrice nécessaire. — Pour une presse travaillant en marche continue on admet une absorption d'énergie de 36 %. Dans l'exemple considéré, il faut donc fournir une énergie de $(2736 \times 1{,}36) = 3720$ J par découpage.

Si la cadence de la presse est de 120 courses par minute (c'est-à-dire qu'une coupe dure 0,5 seconde) la puissance de la machine est égale à : $\frac{3720}{0{,}5} = 7440$ W.

1.5. Matières pour la construction d'outils de découpage et poinçonnage. — Pour la construction des poinçons et des matrices, on emploie de nombreux types d'aciers depuis l'acier au carbone jusqu'aux aciers alliés contenant 12 à 15 % de chrome et également des carbures métalliques.

Pour les outils destinés à des préséries ou au découpage de pièces en matières minces et à tolérances larges, on emploie des alliages à bas point de fusion.

1.5.1. Outils en acier. — Lorsque les sections sont d'épaisseurs variables, ce qui oblige à un traitement thermique délicat, on choisit un acier trempant à l'huile. Dans le cas de poinçons ou de matrices complexes (lesquels doivent nécessairement conserver rigoureusement leurs formes et leurs dimensions), dont les sinuosités ne permettent pas de correction par abrasion, il est nécessaire de choisir un acier dit « indéformable » comme, par exemple, l'acier 150 C6 (C : 1,1 à 1,5 % ; Cr : 1,5 à 2,5 % ; Mn : 0,3 à 0,4,% ; Si : 0,2 à 0,4 %) ou l'acier Z 200 C 12 (C :1,6 à 2,3 % ; Cr : 12 à 15 % ; V : 0,3 à 0,4 % ; Mo : 0,3 à 0,7 % ; Ni : 0,9 % ; W : 1, à 1,2 %).

1.5.2. Outils en carbures métalliques. — Le carbure de tungstène est le plus employé, malgré son prix élevé et bien que la durée de fabrication de l'outil, en raison des moyens mis en œuvre, soit également très supérieur à celle nécessaire à la construction d'un outil en acier.

Le guidage des éléments de coupe doit être très précis, on emploie des blocs à quatre colonnes de guidage (alignement de la partie mobile de l'outil avec la partie fixée sur le plateau de la presse). Dans bien des cas, les matrices sont réalisées en éléments segmentés, assemblés par clavetage ; le système de coins coniques bloqués par vis est un moyen simple et efficace.

Les défauts dus à l'usure de l'outil n'apparaissent dans les pièces produites qu'après un très long service : la qualité moyenne est ainsi sensiblement améliorée.

Les outils en carbure de tungstène permettent un abaissement considérable des prix de revient car, d'une part, la production entre deux affûtages est dix à vingt fois supérieure à ce qu'elle peut être lorsque les outils sont en acier et, d'autre part, la fréquence des affûtages se trouve réduite (de 20 à 50 contre 1). Toutefois, il est évidemment nécessaire que l'importance des séries à découper permette d'épuiser les possibilités de productions de l'outil.

1.5.3. Outils en alliage à bas point de fusion. — L'alliage utilisé, appelé le kayem 1 (désignation commerciale), offre une résistance suffisante pour permettre l'obtention d'un nombre déterminé de pièces (la résistance de cet alliage est approximativement celle de la fonte.) Son prix de revient est assez faible du fait de sa facilité d'usinage, du bas prix de la matière première et des possibilités de récupération de cette matière (jusqu'à 90 %).

Quelques caractéristiques du kayem 1 :

— Masse volumique	6,7 g/cm³
— Résistance à la traction	23 daN/mm²
— Résistance à la compression	80 daN/mm²
— Dureté Brinell	100 — 110
— Température de fusion	390 °C
— Température de coulée	420 — 430 °C
— Retrait de solidification	9 °/₀₀

1.6. Construction d'un outil. — Le poinçon est obligatoirement en acier trempé ; la matrice en kayem 1 est coulée directement sur le poinçon en isolant ce dernier avec un enduit lubrifiant, afin de permettre son dégagement après coulée. Celle-ci se fait en source autour du poinçon et à l'intérieur d'un cadre construit en cornière. L'usinage est très réduit : dressage de la face d'appui et de la face de coupe par fraisage et dépouille de l'ouverture de la matrice. La rapidité d'exécution d'un tel outil permet son amortissement sur un petit nombre de pièces. Son emploi est possible sur tous les types de presses d'usage général.

2. COUPAGE THERMIQUE

2.1. Caractéristiques générales. — Par opposition au découpage mécanique qui, exécuté à froid ou à chaud,

fait intervenir uniquement un effort mécanique de cisaillage (il est exercé soit entre les deux lames d'une cisaille, soit entre le poinçon et la matrice d'un outil de découpe), le coupage thermique permet de débiter une pièce ou de séparer un élément d'un autre sans intervention mécanique, mais uniquement par un changement local d'état dû à une action thermique.

S'agissant de métaux et d'alliages, les procédés de coupage thermique sont séparables en deux groupes bien distincts :

— Premier groupe : la fusion directe du matériau est évitée et le changement d'état résulte d'une oxydation par action chimique d'un jet d'oxygène (d'où le nom d'*oxycoupage* donné à l'opération).

— Second groupe : la fusion directe est obtenue par intervention d'une source de chaleur concentrée (procédés utilisés par ailleurs en soudage).

2.2. Oxycoupage. — On distingue, d'une part, l'oxycoupage ordinaire et ses variantes mettant en jeu la réaction simple d'oxydation, d'autre part, l'oxycoupage avec intervention d'un scorifiant ou d'un combustible complémentaire.

2.2.1. Oxycoupage ordinaire

1° *Principe.* — Un jet d'oxygène sous pression, issu de l'orifice calibré de la buse d'un chalumeau coupeur, est dirigé sur le métal à couper. Celui-ci est attaqué par le jet d'oxygène et l'oxyde formé s'élimine immédiatement dégageant ainsi une nouvelle couche de métal offerte à l'attaque. Le chalumeau est déplacé suivant un parcours correspondant à la géométrie du découpage désiré. L'opération fournit une coupe à flanc rectiligne.

Au-dessus d'une certaine température presque tous les métaux sont vivement attaqués par l'oxygène avec dégagement de chaleur. Cependant, ceux dont l'oxyde est suffisamment fusible et fluide pour s'écouler rapidement par gravité et au souffle de l'oxygène, au point de donner une vitesse de coupe acceptable, sont très rares. En fait, deux métaux industriels seulement sont aptes à l'oxycoupage : le fer et le titane.

Le fer, qui fond vers 1 500 °C et dont la température d'amorçage de combustion se situe entre 1 300 et 1 350 °C, forme un mélange eutectique : 85 % d'oxyde ferreux (Fe O) et 15 % d'oxyde ferrique ($Fe_3\ O_4$). Celui-ci fond à 1 350 °C en dégageant une énergie de 24 000 J par centimètre cube de fer brûlé.

Le titane, dont l'amorçage de la combustion se situe vers 600 °C, donne de l'oxyde de titane (TiO_2) qui, bien que fondant à une température un peu supérieure à celle du titane (1 670 °C), est rendu extrêmement fluide par la très haute chaleur de la réaction dégageant une énergie de 86 000 J par centimètre cube de titane.

Sous forme d'acier, le fer est le métal de loin le plus utilisé en raison de l'abondance de ses minerais, de sa facilité d'élaboration et de ses propriétés d'emploi ; par cela même, il offre un large champ d'application à l'oxycoupage. Malgré l'importance de ses minerais et malgré le grand intérêt de ses propriétés, le titane (et ses alliages) est beaucoup moins utilisé en raison du coût très élevé de son élaboration et des précautions nécessaires à sa mise en œuvre ; cela explique que sa très grande aptitude à l'oxycoupage soit moins connue et peu exploitée. Pour cette raison, il n'est question que d'acier dans ce qui suit, mais le cas du titane est en tout point analogue.

2° *Gaz utilisé.* — L'oxygène, très généralement extrait de l'air par liquéfaction et distillation, est livré sous une pression de 150 bars environ, dans des bouteilles d'acier forgé contenant 5 à 7 m³ d'oxygène (volume du gaz ramené à la pression atmosphérique).

Pour des consommations importantes, ces bouteilles peuvent être groupées en cadres, généralement de 28 éléments. (fig. I-8). On peut aussi recevoir l'oxygène liquéfié ; un vaporiseur permet alors d'obtenir le gaz prêt à l'emploi. Le titre volumique de l'oxygène industriel normal est de 97,5 %, on estime qu'une baisse de pureté de 1 % peut réduire de 13 à 15 % la vitesse de coupe. Le réchauffage de l'oxygène permet un certain accroissement de la vitesse d'oxycoupage, d'autant plus appréciable que ce gaz est moins pur. Cette possibilité est cependant rarement utilisée.

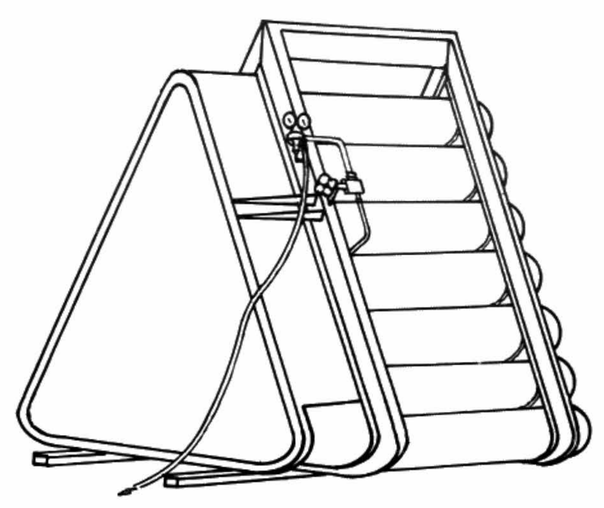


Fig. I-8 — Cadre de bouteilles d'oxygène

Une flamme de chauffe accompagne le jet d'oxygène. Elle intervient d'abord : le jet de coupe étant fermé et le chalumeau étant à l'arrêt, elle sert à porter localement le métal à la température nécessaire à l'amorçage. Par la suite, le jet de coupe étant ouvert et le chalumeau étant lentement déplacé, cette flamme fournit l'appoint de chaleur indispensable à l'entretien de la coupe. Cette flamme est obtenue par combustion d'acétylène, d'hydrogène, de propane, de gaz naturel ou de gaz de houille dans l'oxygène.

L'acétylène et le propane sont les combustibles les plus utilisés et se font concurrence. L'acétylène, gaz endothermique, donne une flamme facile à régler au seul aspect, à une température plus élevée que celle du propane. Il permet un amorçage rapide, et des vitesses de coupe un peu plus grandes qu'avec le propane. Au contraire, pour de très grandes épaisseurs, l'acétylène produit plus facilement la fusion des arêtes supérieures du métal (bien qu'avec ce gaz on puisse couper correctement jusqu'à 1,5 m d'épaisseur). Le propane est moins coûteux que l'acétylène, mais il entraîne une consommation totale plus élevée d'oxygène (flamme de chauffe plus jet de coupe).

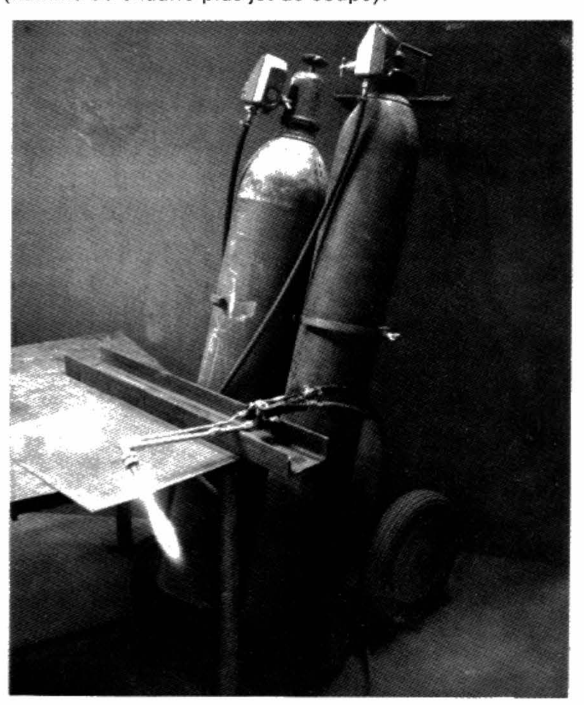


Fig. I-9 — Équipement mobile pour oxycoupage manuel (emploi d'acétylène dissous)

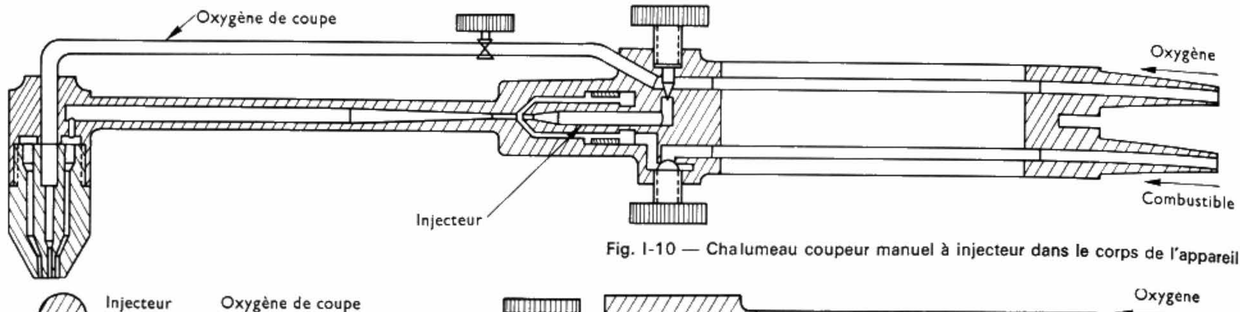


Fig. I-10 — Chalumeau coupeur manuel à injecteur dans le corps de l'appareil

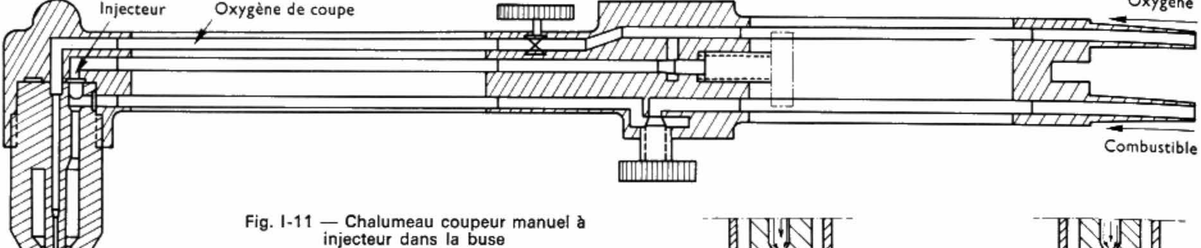


Fig. I-11 — Chalumeau coupeur manuel à injecteur dans la buse

Le propane est livré liquéfié en bouteilles, en conteneurs ou est directement transvasé chez l'utilisateur. L'acétylène est soit livré dissous (en bouteilles), soit produit dans un générateur à partir de carbure de calcium. Cette seconde formule est moins coûteuse, mais le service et l'entretien de l'appareil et les soucis que cause l'évacuation des chaux résiduaires sont à prendre en compte. L'installation d'un générateur d'acétylène, la constitution d'un dépôt de bouteilles d'acétylène ainsi que le stockage de gaz combustibles liquéfiés sont réglementés.

Pour un travail isolé, soit sur chantier, soit artisanal, ou pour un travail d'entretien, le poste d'oxycoupage est constitué d'une bouteille d'oxygène avec détendeur, d'une bouteille d'acétylène (ou de propane) avec détendeur et d'un chalumeau coupeur relié par des tuyaux souples en caoutchouc entoilé aux bouteilles de gaz (fig. I-9). Pour de grands débits de gaz, un groupage de bouteilles en batterie s'impose. Certains travaux nécessitent un poste additionnel à chalumeau pour le préchauffage. Pour un groupement d'activités à poste fixe, oxygène et acétylène (ou propane) sont distribués par canalisations fixes avec détendeur à chaque poste d'utilisation. Dans le cas de générateur d'acétylène basse pression, des intercepteurs antiretour sont installés à chaque poste.

3° *Chalumeau coupeur.* — Les chalumeaux coupeurs sont à débits multiples par le jeu de buses interchangeables. Côté flamme de chauffe, le gaz combustible est entraîné par l'oxygène par passage dans un injecteur, situé soit dans le corps de l'appareil (fig. I-10), soit dans la buse (fig. I-11).

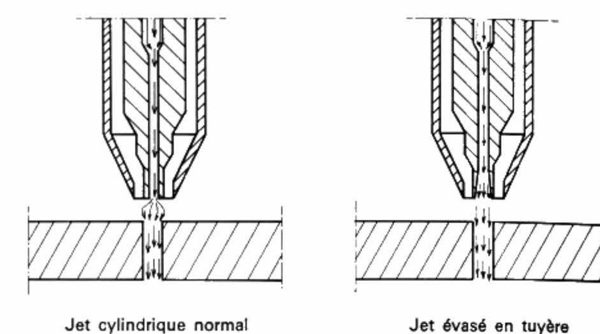
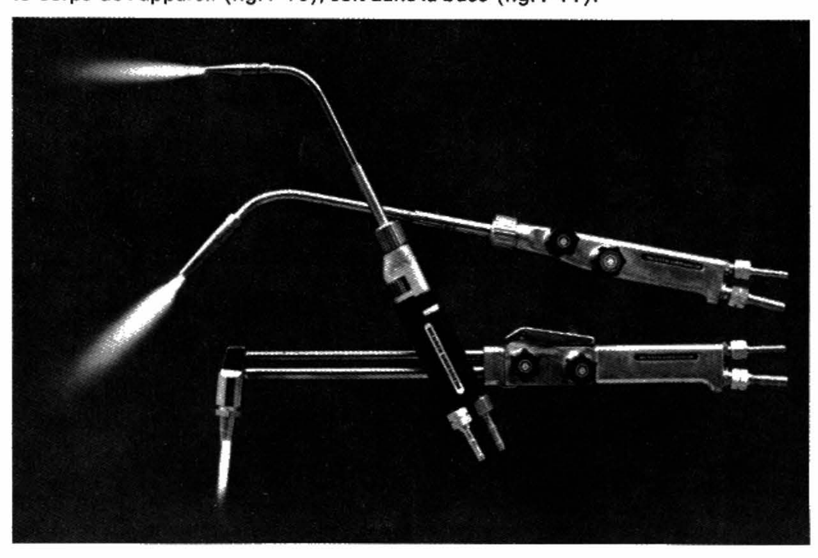


Fig. I-12 — Forme du jet de coupe

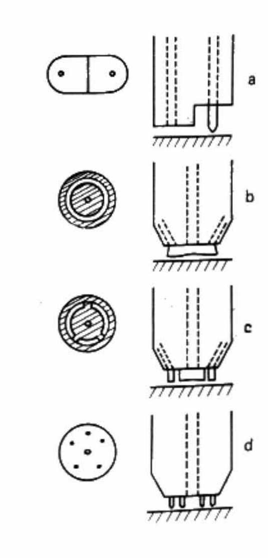
Le diamètre du canal d'oxygène de coupe diminue vers l'extrémité ; le canal est terminé par un orifice cylindrique soigneusement calibré (fig. I-12).

La flamme de chauffe est constituée ou bien d'un dard unique (fig. I-13 a), précédant le jet de coupe (ce qui est le cas seulement de coupes fines, c'est-à-dire de moins de 5 mm d'épaisseur), ou bien d'une flamme circulaire entourant le jet de coupe, laquelle forme une couronne soit continue (fig. I-13 b), soit interrompue par des plots de centrage (fig. I-13 c), ou encore plusieurs dards équidistants (fig. I-13 d). Orifices de coupe et orifices de chauffe sont solidairement définis et associés en fonction des épaisseurs



Deux chalumeaux soudeurs-coupeurs (épaisseur de coupe : 60 mm) et un chalumeau coupeur (épaisseur de coupe : 300 mm) (*Messer Griesheim*)

Fig. I-13



à couper. Les variations relatives de chauffe et de coupe éventuellement nécessaires sont obtenues en choisissant des buses d'un calibre convenable et en réglant les pressions des gaz.

Pour faciliter son emploi, le chalumeau pour coupe manuelle comporte une buse perpendiculaire au corps de l'instrument et l'oxygène de chauffe est pris en dérivation sur l'oxygène de coupe (V. fig. I-10 et I-11). Le chalumeau pour coupe machine est rectiligne (fig. I-14) ; les arrivées d'oxygène de coupe et d'oxygène de chauffe sont indépendantes et les pressions peuvent être différentes.

Contrairement au cas du soudage, la flamme oxyacétylénique pour oxycoupage est généralement réglée pour être oxydante. On atteint ainsi un meilleur rendement et le métal n'étant pas fondu, son oxydation n'est pas à redouter. Pour oxycouper, on amorce d'abord la coupe, au bord de la pièce, chalumeau immobile, la flamme de chauffe agissant seule. Une fois qu'une température voisine de 1 300 °C est atteinte localement, la canalisation de l'oxygène de coupe est brusquement ouverte La coupe s'amorce instantanément et le chalumeau est déplacé. L'extrémité du dard de chauffe doit se trouver près de la surface de la pièce sans être écrasé. Certaines buses pour coupe de pièces épaisses ont un orifice pour jet de coupe évasé en forme de tuyère, ce qui évite la turbulence du gaz à la sortie et permet de plus grandes tolérances dans le maintien de la distance entre la buse et la surface de la pièce. Ces buses présentent l'inconvénient d'être coûteuses.

En entourant le jet de coupe d'un mince jet annulaire d'oxygène complémentaire (buse-rideau), on obtient des réglages plus souples et des vitesses de coupe plus grandes Cela est utilisé dans certains chantiers navals.

4° *État de surface des pièces, composition des aciers, préchauffage.* — L'amorçage en surface de la combustion du fer, l'évacuation à la base de l'oxyde formé, sont facilités si le matériau à oxycouper est propre. Les couches épaisses de peinture ou d'enduit doivent être préalablement brûlées sur le trajet de coupe ; la flamme de chauffe peut y suffire. Pour l'oxycoupage de tôles grenaillées prépeintes, on est généralement conduit à augmenter l'importance de la flamme de chauffe mais les buses s'encrassent plus fréquemment. Au contraire, sur tôle brute, se forme une calamine épaisse qui éclate et risque de boucher la buse. Le passage préalable d'un râteau décalamineur à flamme oxyacétylénique permet de remédier à cet inconvénient. La croûte recouvrant les pièces d'acier moulé, lorsqu'elle est épaisse, doit être éliminée sur les deux faces par un sillon à la meule ou au burin.

L'amorçage d'une coupe, soit sur bord arrondi, soit en pleine paroi, est difficile, l'arête vive d'une entaille facilite l'opération. L'amorçage d'une coupe en pleine surface d'une pièce épaisse risque de détériorer la buse, l'exécution préalable d'un trou soit par perçage, soit à la lance à oxygène permet d'éviter cette difficulté (V. ci-après 2.2.3).

L'acier diffère du fer par les éléments complémentaires qu'il comporte : carbone, silicium, manganèse, soufre, phosphore et éventuellement cuivre et aluminium pour les aciers au carbone ; chrome, nickel, molybdène, cobalt, vanadium, tungstène pour les aciers alliés.

Des teneurs élevées en carbone nécessitent une flamme de chauffe de puissance accrue : avec 0,5 % de carbone le préchauffage s'impose pour éviter la fusion des arêtes ; à partir d'une teneur 1,9 % l'oxycoupage classique devient impossible (le graphite des fontes par sa lenteur de combustion et le volume de gaz fourni s'opposent à l'oxycoupage ordinaire). On peut couper des aciers doux à teneur en silicium élevé (jusqu'à 4 %).

Le manganèse facilite l'oxycoupage. Malheureusement, les aciers à forte teneur en manganèse sont trop sensibles au choc thermique pour être oxycoupés. Aux teneurs usuelles, le soufre, le phosphore, le cuivre et l'aluminium n'ont aucune influence. Les aciers chargés en aluminium sont plus difficilement oxycoupables ; une teneur en aluminium de 6 % est la limite pour l'oxycoupage ordinaire. Lorsque la teneur en chrome atteint 2 %, il faut doubler la puissance de la flamme de chauffe ; une teneur de 5 % est la limite pour l'oxycoupage ordinaire. Les aciers au nickel à basse teneur en carbone sont oxycoupables tant que la teneur en nickel ne dépasse pas 35 % ; il faut cependant accroître la flamme de chauffe. Le molybdène, le cobalt et le vanadium ne font que renforcer la gêne d'autres éléments plus nuisibles à l'oxycoupage. Il en est de même du tungstène qui ne devient gênant par lui-même que si sa teneur est comprise entre 8 et 20 % (teneur limite pour l'oxycoupage ordinaire).



Fig. I-14 — Oxycoupage multiple sur machine à plusieurs chalumeaux et à commande numérique (*Messer-Griesheim*)

Pour les aciers, l'oxycoupage est plus intéressant que le découpage mécanique car il évite l'écrouissage, générateur ensuite de vieillissement. Pour les aciers renfermant plus de 0,25 % de carbone et pour les aciers alliés trempants, la rapidité du refroidissement qui suit l'oxycoupage détermine la trempe des bords oxycoupés. On évite ce risque en préchauffant les aciers au carbone demi-dur vers 150 °C et les aciers trempants faiblement alliés vers 250-300 °C. Autrement dit, on prend sensiblement les mêmes précautions que pour le soudage. D'une manière générale, le préchauffage accroît la rapidité d'oxycoupage et permet une économie des gaz utilisés. Un préchauffage vers 500 °C serait excessif car il rendrait la conduite de la coupe irrégulière.

Les soufflures des aciers moulés et les doublages des aciers laminés causent des désamorçages de la coupe par interruption des échanges thermiques. Les poches de sable dans les pièces moulées et les inclusions de laitier dans les soudures sont des causes plus directes encore de désamorçage.

5° *Conditions d'oxycoupage des aciers doux.* — Sur les faces oxycoupées, l'écoulement du jet d'oxyde détermine des stries. La conjugaison du temps normal de cet écoulement et de l'avance suffisamment rapide du chalumeau imprime aux stries une inclinaison progressive, dénommée « retard à la coupe ». Un retard à la coupe voisin de 10 % (fig. I-15) est l'indice d'une vitesse d'avance correcte.

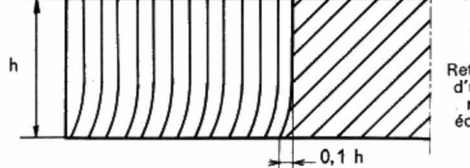


Fig. I-15 Retard normal d'une coupe rectiligne économique

En cas de coupe non rectiligne, le retard à la coupe altérant les formes obtenues doit être réduit en diminuant la vitesse. La coupe en chanfrein nécessite une flamme de chauffe plus forte. La vitesse de coupe est abaissée de 20 à 30 %. En coupe en chanfrein, la distance buse-pièce doit

être tenue à une valeur précise si l'on veut obtenir une pièce aux formes et dimensions désirées.

Le tableau I définit, pour un retard à la coupe de 10 %, le diamètre de la buse de coupe, la pression d'oxygène, la vitesse de coupe et la consommation de gaz pour de l'acier doux de bon état de surface, en cas de coupe rectiligne normale avec acétylène, l'avance étant automatique.

Tableau I

Conditions d'oxycoupage de l'acier doux

e (milli-mètres)	Orifice de coupe ⌀ (milli-mètres)	Pression oxygène (bars)	Vitesse coupe (mètres par heure)	Consom-mation d'oxygène par centi-mètre carré (litres)	Débit d'acétylène (litres par heure)
5	1,0	2	30	0,7	280
10	1,0	2,8	23	0,7	280
25	1,5	2,8	14	0,6	450
50	2,0	2,8	12	0,6	650
100	2,5	3,5	10	1,2	1 000
150	2,5	4,0	9	1,5	1 100
200	3,0	5,0	8	2,5	1 400
300	3,5	5,5	8	2,5	3 000
400	4,0	6	7	2,5	4 000

6° *Défauts des coupes.* — Les principaux défauts des coupes sont (fig. I-16) :

a) la fusion d'arête imputable à une flamme trop puissante ou à une avance trop faible ;

b) l'affouillement et la déformation de la coupe par pression excessive ou débit trop faible ;

c) le désamorçage soit par retard excessif dû à une avance trop rapide ou à un débit insuffisant d'oxygène, soit par défauts de compacité (dédoublages) ;

d) la déformation de la coupe du fait de l'encrassement de la buse ;

e) la remontée d'oxyde, dans le cas de faibles épaisseurs, si la flamme de chauffe est excessive (ressource du jet séparé).

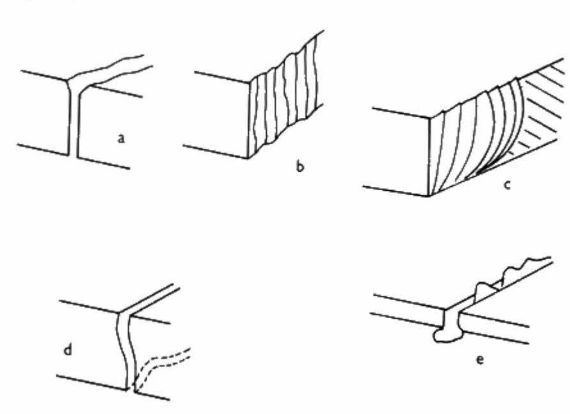


Fig. I-16 — Principaux défauts des coupes

7° *Contraintes et déformations d'oxycoupage.* — Au cours de l'exécution d'une coupe *mn* (fig. I-17 a) divisant longitudinalement une pièce en deux parties égales, la dissymétrie *ab* — *bc* du cycle thermique local, dû

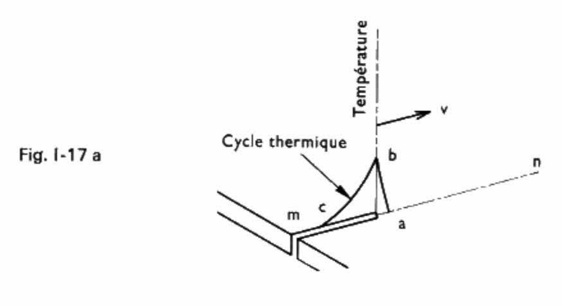


Fig. I-17 a

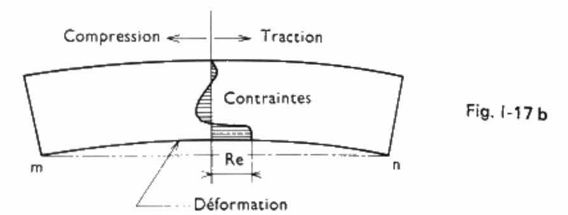


Fig. I-17 b

au passage du chalumeau coupeur, détermine un raccourcissement de la zone chauffée avec mise en contrainte à la limite d'élasticité *Re* de la zone *mn* bordant la coupe (fig. I-17 b). Pour produire des bandes oxycoupées rectilignes 1 et 2 (fig. I-17 c) on exécute simultanément la coupe *xy* et les coupes symétriques *rs* et *uv* pour affranchir les rives.

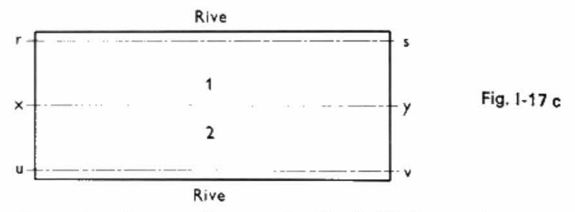


Fig. I-17 c

Pour obtenir une pièce ronde (fig. I-17 d) avec le minimum de déformations par rapport au gabarit à reproduire, le parcours 1 est recommandé car il maintient plus rigidement la pièce à obtenir. De même l'exécution successivement des coupes *A, B, C, D, E,* puis *A, F, E* (fig. I-17 e) réunit l'exécution symétrique et le maintien rigide de l'élément coupé. L'intervention judicieuse de coins ou de ponts de liaison permet d'annuler ou de réduire les déformations.

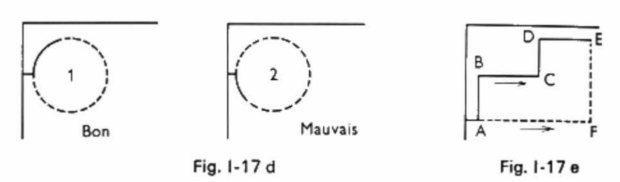


Fig. I-17 d

Fig. I-17 e

8° *Guidage du chalumeau — Machine d'oxycoupage.* — La coupe à main levée n'est guère admise qu'en démolition. La qualité et l'économie des coupes découlent de la précision du guidage et de l'avance du chalumeau. L'absence de réaction d'outil permet la création de dispositifs de conduite légers, rigides et à large évolution.

a) *Guidage suivant tracé sur pièce.* — Un simple guide à roulettes, prenant appui s'il y a lieu sur une règle ou un compas, procure au chalumeau une stabilité suffisante.; l'avance peut alors être manuelle (fig. I-18). Des chariots

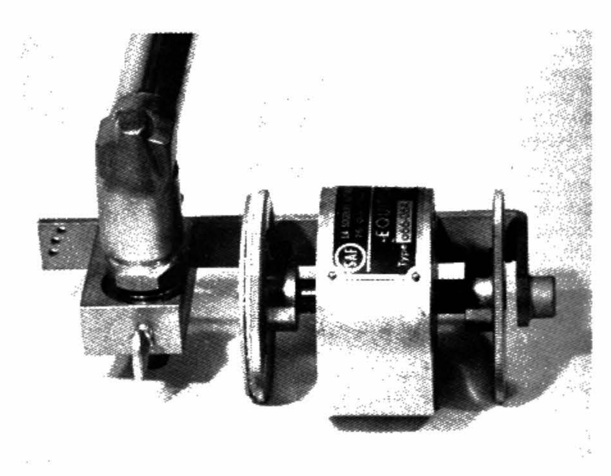


Fig. I-18
Guide à roulettes à régulation par inertie pour coupes droites ou circulaires, normales ou en chanfrein (*S.A.F.*)

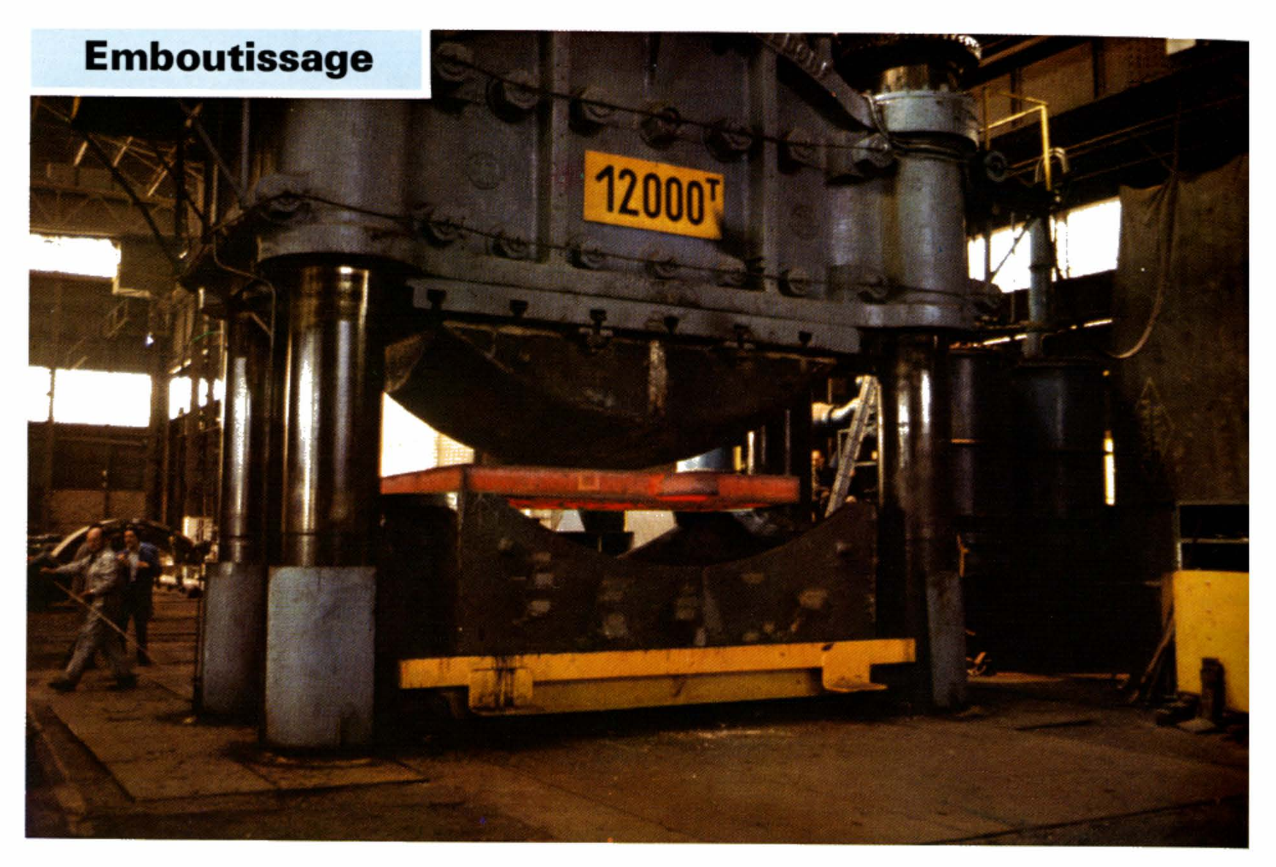
Découpage



Ci-dessus, oxycoupage d'une pièce en acier.
Ci-dessous, oxycoupage d'une tôle épaisse en acier.

Photos : Creusot-Loire.

Emboutissage





Formage d'une tôle à la presse:

Ci-dessus, début de l'opération ; *ci-contre,* la tôle en cours de formage.

Photos : Creusot-Loire.

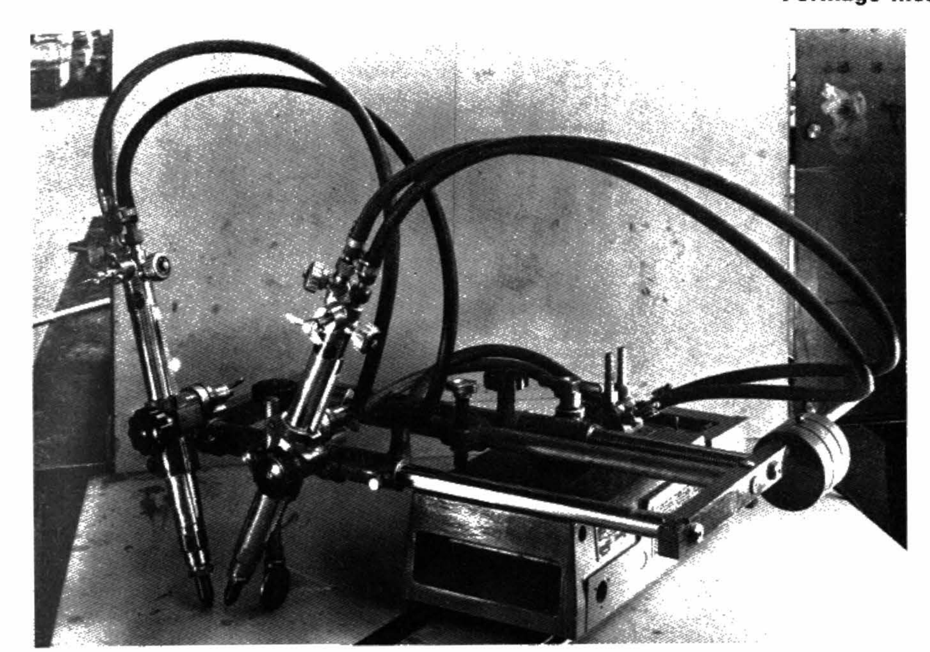


Fig. I-19

Chariot automoteur d'oxycoupage pouvant opérer sur guide rectiligne ou sur compas; coupes normales sur 3 à 300 mm d'épaisseur; coupes en chanfrein jusqu'à 200 mm d'épaisseur; ici le chariot est équipé de deux chalumeaux pour chanfreinage en X (*Lacheroy-L'Air Liquide*)

automoteurs porte-chalumeau (fig. I-19), guidés par une règle ou par un compas, conviennent, même sur forte épaisseur, à des travaux de chantiers.

b) *Guidage suivant parcours défini hors pièce*

— *Guidage simple.* — Il s'agit généralement d'équipements spécialisés. C'est le cas de certains bancs d'oxycoupage rectilignes qui servent à débiter des tôles bien équerrées de grande étendue (fig. I-20) et de certaines machines courantes utilisées pour couper des brides et des disques. Des dispositifs permettant un mouvement vertical important assurent la coupe automatique de profilés, de ronds, de pièces moulées ou forgées. Des machines à couper les tubes servent à engendrer toutes sortes d'intersections propres aux constructions tubulaires.

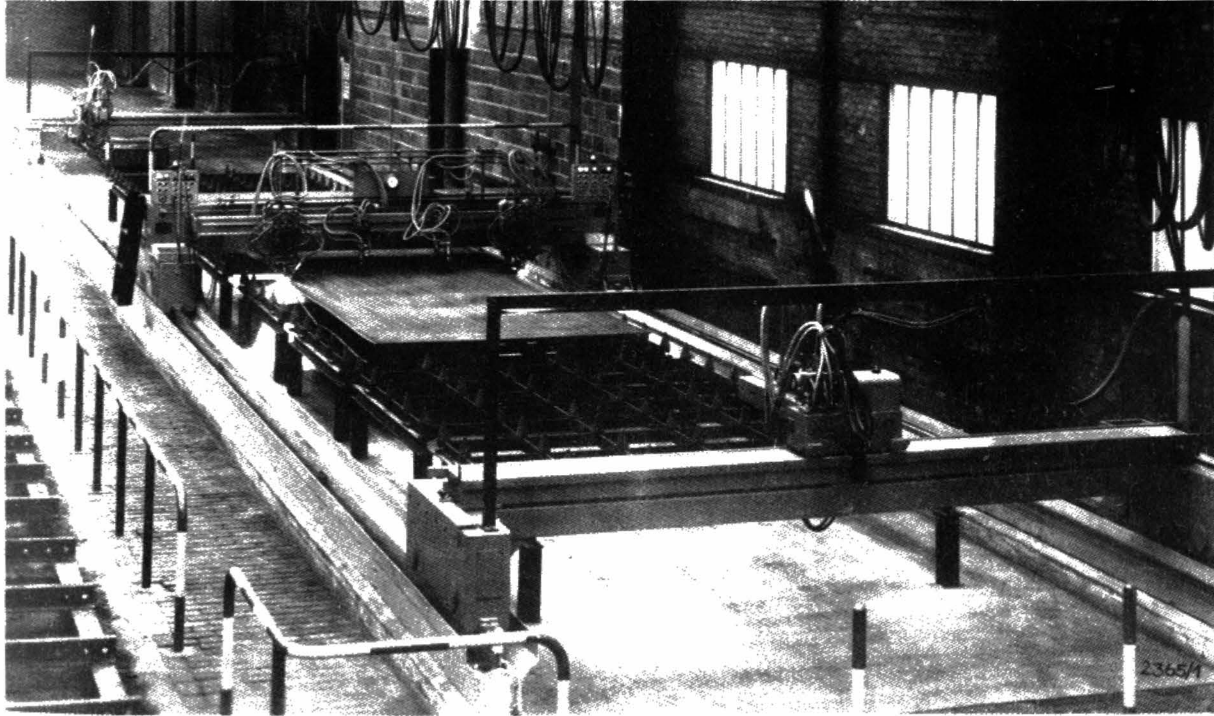
— *Guidage universel.* — Le bras mobile de la machine est animé d'un mouvement uniforme dans la direction qu'impose l'un des trois systèmes de commande qui suivent.

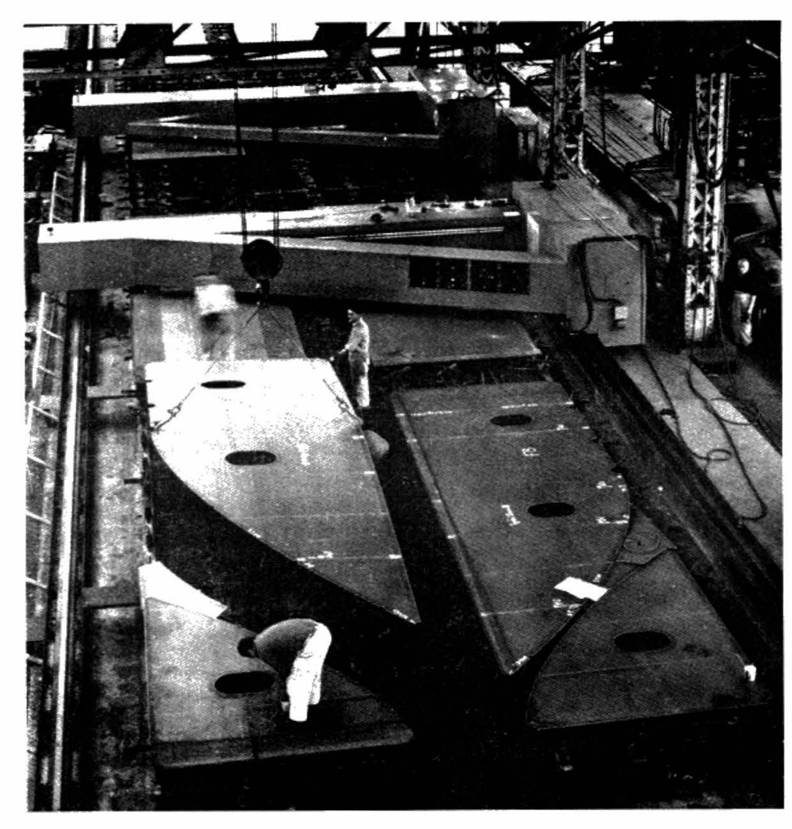
— *Guidage magnétique.* — Ce guidage dépend d'une molette magnétique, tournant à une vitesse réglable, attirée contre le chant d'un gabarit en tôle d'acier doux de 4 à 5 mm d'épaisseur. Le gabarit est tracé et découpé en tenant compte du rayon de la molette dont on déduit la demi-largeur du jet de coupe. Le gabarit est direct ou inverse suivant que, pour un contour externe de la pièce, la molette le suit soit extérieurement, soit intérieurement.

— *Guidage optique.* — Un équipement électronique commandé par des cellules photoélectriques assujettit le bras mobile à suivre un tracé noir sur une feuille de matière plastique blanche. Certaines machines, équipées pour la coupe de pièces de grandes dimensions, « suivent optiquement » un tracé de haute précision exécuté à l'échelle 1/10; cela limite l'encombrement des gabarits. Certaines sont conçues pour fournir un tracé optique à l'échelle 1/10 à partir de microfilms à l'échelle 1/100.



Fig. I-20 — Installation d'oxycoupage à trois portiques; largeur de coupage: 4 m (*Messer-Griesheim*)





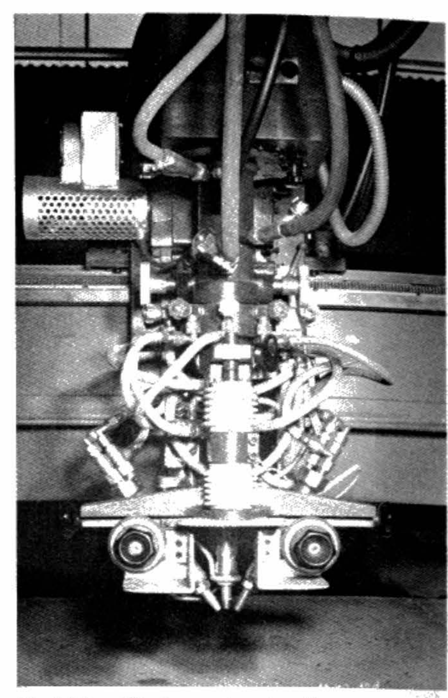


Fig. I-23 — Tête tournante automatique pour coupe en chanfrein sur pièce de forme, avec palpeur capacitif pour maintenir constant l'écartement entre buse et tôle (*Messer-Griesheim*)

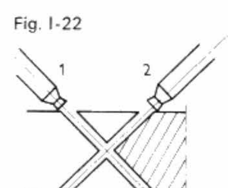
Fig. I-21 — Machine d'oxycoupage à coordonnées xy pour tôles planes de 5 à 300 mm; commande par calculatrice à 5, à 7 ou 8 canaux (*Lacheroy-L'Air Liquide*)

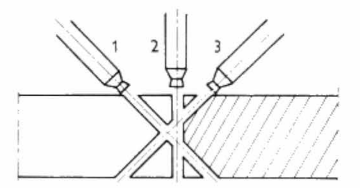
— *Commande numérique.* — Un équipement électronique commandé par bande perforée ou par bande magnétique impose à l'équipement mobile de la machine, un parcours fait de lignes droites, d'arcs de cercles et d'arcs de paraboles (fig. I-21). Dans certains chantiers de construction navale, la commande numérique de la machine d'oxycoupage est associée au service d'un ordinateur et d'une table traçante automatique, qui définissent, d'après les caractéristiques imposées du navire, le lissage des formes, le développement des éléments composants à oxycouper. Dans le même temps l'imbrication des tracés sur une même feuille et le parcours minimal à suivre sont prédéterminés.

9° *Précision de l'oxycoupage ordinaire.* — L'oxycoupage ordinaire correctement appliqué peut assurer une précision de coupe du 0,5 mm sur des longueurs voisines d'une vingtaine de mètres; cela justifie son emploi pour la préparation précise de grands ensembles. Sur pièces massives, la conjugaison de coupes diversement orientées peut, dans une certaine mesure, éviter ou simplifier le forgeage et réduire ou supprimer l'usinage.

10° *Coupe à plusieurs chalumeaux.* — L'action combinée de plusieurs chalumeaux se suivant dans un ordre déterminé permet en coupe rectiligne ou circulaire la réalisation soit d'un chanfrein double (avec deux chalumeaux), soit d'un chanfrein double avec méplat (avec trois chalumeaux) (fig. I-22 et I-23).

Fig. I-22





2.2.2. Variantes de l'oxycoupage ordinaire

1° *Dérivetage. Détubage. Gougeage.* — Des variantes de forme du chalumeau coupeur ordinaire permettent des opérations spéciales d'oxycoupage telles que:

a) *coupe de boulons* ou de *têtes de rivets* permettant le démontage rapide et la récupération des éléments intacts d'un ouvrage métallique assemblé mécaniquement;

b) *coupe intérieure des tubes* d'un faisceau tubulaire à remplacer, laissant ainsi intacte la plaque tubulaire;

c) *gougeage* assurant notamment, avant reprise à l'envers, le dégagement de la racine d'une soudure bout à bout (l'opération exige une certaine dextérité).

2° *Décriquage.* — Un chalumeau décriqueur est un chalumeau spécial gougeur de grande puissance, pourvu d'une baguette de fer qui permet l'amorçage en pleine paroi; débitant 20 à 40 m³/h d'oxygène, tenu incliné de 15 à 30° et avancé de 10 à 12 m/mn, il peut, (fig. I-24), par des saignées de 30 à 40 mm de large et de 2 à 10 mm de profondeur, éliminer des défauts superficiels des demi-produits de forge (bloom et billettes). Plus rapide que la

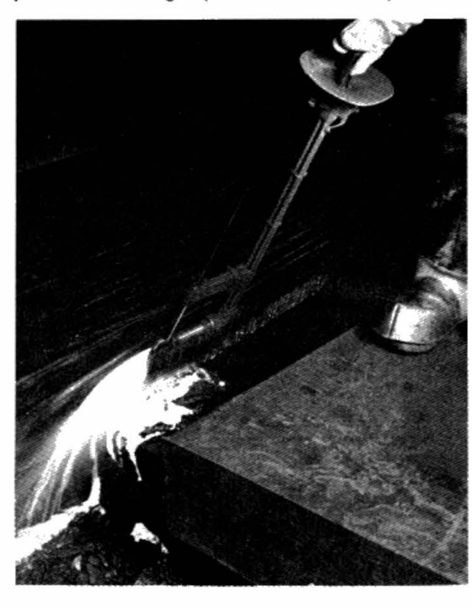


Fig. I-24

Décriqueur manuel (*Messer-Griesheim*)

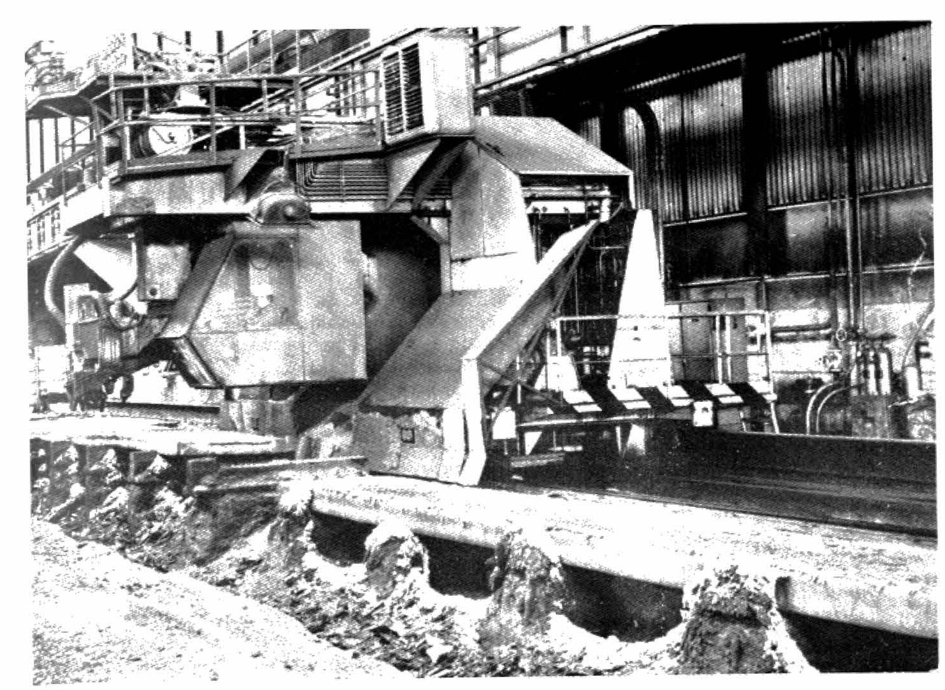


Fig. I-25

Machine de décriquage sélectif (*S.A.F.*)

meule ou le burin, il dégage des surfaces lisses et non matées, permettant de suivre jusqu'à sa racine la fissure à éliminer. Un opérateur manuel entraîné peut enlever jusqu'à 200 kg/h de métal. Des machines semi-automatiques plus puissantes rendent l'opération plus rapide. Au prix d'une mise au mille moins favorable, l'aciériste peut substituer au décriquage à vue local, l'écroûtage superficiel total. Des machines automatiques à plusieurs chalumeaux « rabotent » ainsi les quatre faces d'un bloom, éliminant 200 kg de métal par minute avec 10 l d'oxygène et 1 l d'acétylène par kilogramme de métal enlevé (fig. I-25).

3° *Oxy-usinage.* — Bien que peu utilisé, rabotage et tournage continus au chalumeau décriqueur peuvent constituer un usinage d'ébauche.



Décriquage manuel (*Messer-Griesheim*)

2.2.3. Oxycoupage avec intervention d'adjuvants

1° *Chalumeau coupeur à poudre de fer.* — De nombreuses tentatives d'extension de l'oxycoupage à la fonte et aux aciers inoxydables ont eu lieu dans le passé: maniement d'une baguette de fer dans le sillon de coupe, chalumeau spécial à injection soit d'acétylène, soit d'une poudre scorifiante (CO_3NaH), abrasive (silice), ou combustible (aluminium ou fer) dans l'oxygène de coupe.

L'injection de poudre de fer s'est révélée la solution la meilleure.

Le chalumeau oxycoupeur à poudre de fer (fig. I-26) convient à la coupe de tôles en paquet, de pièces d'acier

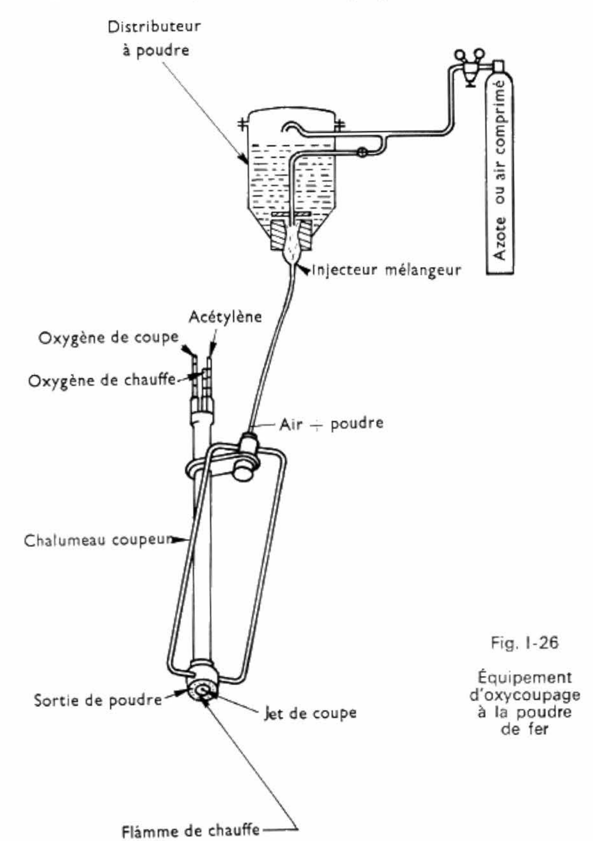


Fig. I-26

Équipement d'oxycoupage à la poudre de fer

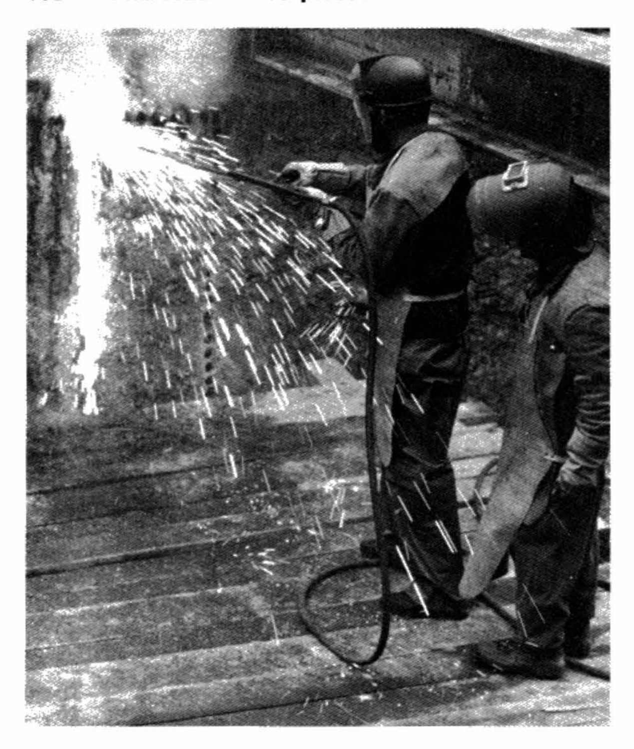


Fig. I-27 — Forage thermique d'un massif de béton à la lance à oxygène (*Lacheroy-L'Air Liquide*)

inoxydable, de fonte, d'alliages d'aluminium, de nickel, d'alliages cuivreux. L'épaisseur des matériaux coupés peut atteindre 300 mm dans le cas d'aciers inoxydables et 500 mm lorsqu'il s'agit de fonte. Cependant, la consommation de gaz est plus que doublée par rapport à l'oxycoupage ordinaire des aciers. La consommation de poudre est importante. Une puissante aspiration des fumées s'impose. L'aspect des coupes est moins régulier que celui d'une coupe ordinaire sur acier doux.

2° *Lavage à l'oxygène.* — Le lavage à l'oxygène avec chalumeau à poudre de fer et sur aciers moulés est l'homologue de l'écroûtage sur pièces de forge (V. ci-dessus § 2.2.2, 2°).

3° *Perçage à la lance d'oxygène. Lance ordinaire.* — Un tube de fer 8/13 à 15/21 (le premier nombre représente le diamètre intérieur et le second le diamètre extérieur), alimenté d'oxygène sous pression, permet le perçage d'une pièce d'acier après amorçage de la réaction par chauffage superficiel local de cette pièce; par un mouvement de va-et-vient de la lance, la coupe est élargie en sillon. Une épaisseur de coupe de 2,1 m a ainsi été atteinte.

Lance bourrée. — Un tube de fer de 3 à 10 m de long, empli de fils de fer, sous 5 à 7 bars d'oxygène entre en combustion après amorçage de l'extrémité par chauffage. La lance bourrée ainsi constituée peut percer la fonte, le ciment, les loupes de fonderie, les scraps et les trous de coulée des hauts fourneaux (fig. I-27).

Voici les caractéristiques de telles lances :

Diamètres (intérieur et extérieur) des tubes	Nombre de fils	Diamètre fils
5/10	3	2
8/13	14	2
12/17	12	3
15/21	16	3

Des trous peuvent être percés dans la maçonnerie pour le passage de câbles ou de canalisations ou pour l'amorçage d'une destruction (dans ce cas l'action d'un jet d'eau active la dégradation).

Lance à poudre de fer. — Le bourrage d'une lance étant laborieux, l'injection de poudre de fer peut être préférée pour l'exécution de trous ou de saignées; l'action de l'eau est alors déconseillée.

Lance oxykérosène. — La combustion de kérosène dans l'oxygène et l'injection d'eau assurent la désagrégation des roches en forages profonds.

2.2.4. Coupage et gougeage oxy-arc. — Des électrodes enrobées pour soudage à l'arc présentant une âme tubulaire peuvent être branchées sur une réserve d'oxygène; elles se comportent alors comme de petites lances. L'arc obtenu produit l'amorçage et entretient la combustion; le laitier complète l'action scorifiante de l'oxyde formé. On peut ainsi oxycouper et surtout gouger des pièces d'acier, de fonte ou de cupro-aluminium. Toutefois, le maniement de l'appareil exige de l'habileté.

2.3. Procédés intervenant par fusion localisée

2.3.1. Coupage simple à l'arc au charbon. — Le coupage par fusion du métal à l'arc est une opération grossière de destruction qui n'est plus guère pratiquée. Pour obtenir un débit acceptable, il faut recourir à des courants très intenses; par suite le porte-électrodes est très lourd et le travail est pénible.

2.3.2. Coupage à l'électrode enrobée de découpage. — Certaines électrodes d'acier à enrobage spécialement scorifiant permettent, en fondant sous l'arc électrique, le gougeage et un peu le coupage de tôles d'épaisseur modérée. Leur emploi est peu répandu.

2.3.3. Coupage arc-air. — Un arc est établi entre une électrode cuivrée en graphite et la pièce à mettre en œuvre. L'ensemble est alimenté sous une tension continue, l'électrode étant positive; l'intensité du courant atteint 200 A pour une électrode de 6 mm et 500 A pour une électrode de 13 mm. Un puissant jet d'air comprimé sous 6 à 7 bars, d'un débit de 1 m³/mn, chasse le métal fondu dès sa formation (fig. I-28). Ce procédé, plus rapide et

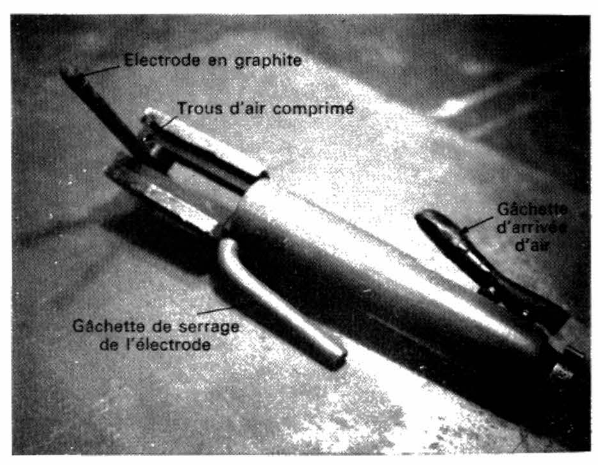


Fig. I-28 — Torche de coupage arc-air

moins bruyant que le burinage, est très utilisé pour le gougeage à l'envers et le dégagement de défauts des soudures sur acier de toute nature. Lorsque la trempe est à craindre, un meulage des surfaces traitées est nécessaire.

Des équipements plus puissants conviennent au coupage et au chanfreinage en tulipe d'aciers de tout type en vue du soudage.

2.3.4. Coupage au chalumeau à plasma. — Les plasmas sont des milieux gazeux portés à un taux important d'ionisation, ce qui suppose, à la pression atmosphérique, une température extrêmement élevée.

Dans une torche à plasma d'arc soufflé, un arc à courant continu est établi, en atmosphère confinée, entre une électrode négative en tungstène et une anode annulaire en cuivre. Celle-ci est prolongée par un canal de sortie étroit, également en cuivre. L'ensemble est énergiquement

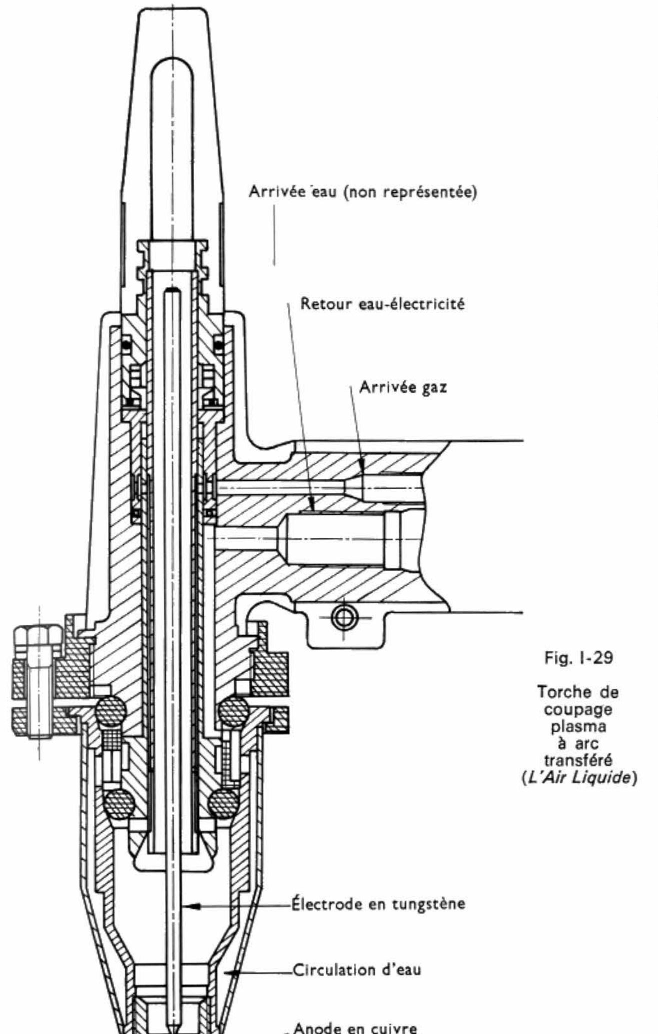


Fig. I-29
Torche de coupage plasma à arc transféré (*L'Air Liquide*)

Tableau II

Caractéristiques d'exécution de coupes à chalumeau à plasma

Matériaux	e (millimètres)	W (kilowatts)	Vitesse (centimètres par minute)
Alliage d'aluminium	20 70 200	35 75 150	280 50 25
Cuivre	60 100	70 100	12 6
Acier inoxydable	20 70 100	35 75 100	150 30 15

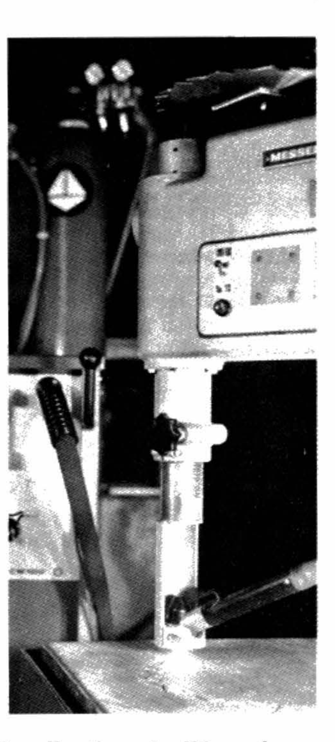
refroidi. Les gaz injectés, énormément dilatés, « pincés électromagnétiquement » (les particules chargées du plasma sont soumises à un champ magnétique et sont repoussées vers l'axe du tube) et par effet de paroi froide du canal, sortent à vitesse supersonique à une température comprise entre 8 000 et 20 000 °C. Cette torche, à faible rendement énergétique ne convient qu'à la coupe de tôles minces.

Les torches plasma à arc transféré (fig. I-29), où le jet de plasma d'abord confiné se développe ensuite librement jusqu'à la pièce constituant l'anode, délivrent à cette pièce une plus grande part d'énergie et permettent un coupage correct.

Les torches plasma de coupage sont alimentées en mélange argon-hydrogène ou azote-hydrogène.

Alors que l'oxycoupage développe également ses effets sur toute l'épaisseur du matériau et donne une coupe de largeur constante, le chalumeau à plasma ne permet d'obtenir qu'une coupe plus large en surface qu'en fond.

Le prix élevé d'une torche plasma et les risques de détérioration sont des facteurs économiques importants. Aussi, la coupe au chalumeau à plasma ne concurrence-t-elle pas l'oxycoupage ordinaire dans ses applications. En revanche, son usage s'est rapidement développé pour les aciers inoxydables et réfractaires, l'aluminium, le cuivre, la fonte, etc. Le tableau II donne quelques indications sur les conditions de coupe au chalumeau à plasma avec un mélange soit argon-hydrogène (2 A + 1 H_2), soit azote-hydrogène (8 N_3 + 3 H_2). Les performances maximales en épaisseur sont inférieures à celles de l'oxycoupage ordinaire sur acier.



Installation de coupage plasma montée sur machine à guidage magnétique (*Messer-Griesheim*)

2.3.5. Coupage par focalisation de l'énergie. — Deux formes d'énergie rayonnante se prêtent à une concentration extrême et, portant à fusion des parties très localisées de pièces, y pratiquent des entailles, des trous ou des fentes d'une finesse extrême, à l'échelle du micro-usinage. Ce sont le faisceau d'électrons et le rayonnement laser.

— Le canon à électrons du type Zeiss (V. t. 3, Soudage, fig. VII-46), conçu comme une colonne de microscope électronique, peut percer dans le métal (ou d'autres matériaux) des trous extrêmement fins, suffisamment profonds pour transformer en tube un tronçon de fil capillaire, suffisamment voisins pour conférer la transparence à une feuille d'acier inoxydable.

— Le rayonnement de lumière cohérente ou rayon laser (V. t. 2, Électrothermie, chap. 5 § 3) est utilisable en perçage, en coupage thermique et même en micro-oxycoupage.

Le laser solide obtenu à partir soit d'un rubis dopé au chrome, soit d'un grenat dopé au néodyme (ou YAG), permet le perçage de trous de 10 à 200 μm sur des métaux, des réfractaires ou des plastiques.

Le laser à gaz carbonique, ou moléculaire, pouvant fonctionner en émission continue, aux puissances disponibles de 150 à 300 W, permet de couper des feuilles de métal de 0,05 à 3 mm d'épaisseur (fig. I-30) et de donner, particulièrement sur acier inoxydable, des coupes d'aspect net.

Un laser moléculaire peut, sous jet d'oxygène, piloter l'oxycoupage de pièces minces de 0,05 à 4 mm d'épaisseur avec des vitesses de coupe sur acier ou titane de 0,5



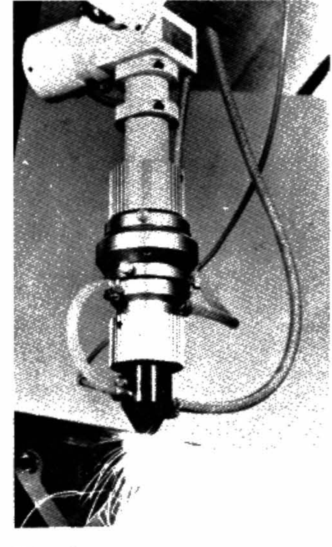


Fig. I-30

Coupage, sous faisceau laser, de titane de 2 mm d'épaisseur, avec système de reproduction à lecteur électronique xy (*S.A.F.*)

à 10 m/mn sur de très faibles largeurs de coupe (0,1 à 0,4 mm).

2.4. Coupage sous l'eau. — Le développement donné aux travaux fluviaux et sous-marins justifie l'emploi fréquent du coupage sous l'eau qui s'opère de différentes manières.

L'oxycoupage ordinaire de l'acier peut être réalisé sous l'eau en utilisant un chalumeau coupeur spécial (fig. I-31) dont la buse est prolongée d'une chambre de combustion assurant le refoulement de l'eau par les gaz. L'allumage a

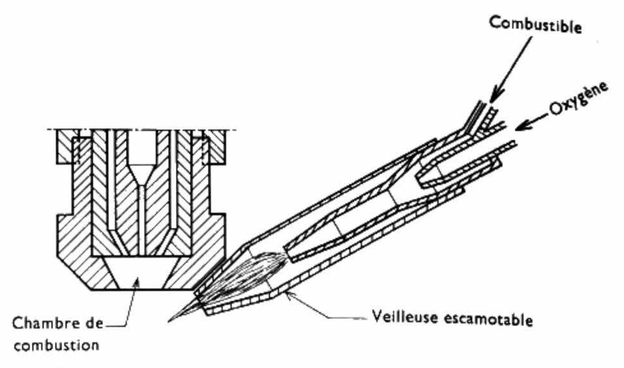


Fig. I-31 — Extrémité de la buse d'un chalumeau coupeur sous l'eau et veilleuse de réallumage

lieu par veilleuse escamotable de même conception. La profondeur d'emploi est 10 m pour l'acétylène, 30 m pour le propane ; il n'y a pas de limite pour l'hydrogène. L'aspect des coupes serait excellent si l'état de surface des pièces et la turbidité de l'eau ne nuisaient pas à la conduite du travail. C'est pourquoi, pour les travaux de démolition, on préfère l'oxycoupage de l'acier à l'arc. L'électrode peut être un tube en acier ou en laiton ; cependant, l'électrode creuse en graphite ou en produits composites est davantage utilisée. Sur métaux ferreux ou non ferreux de moins de 12 mm d'épaisseur, le coupage à l'arc par simple fusion sans oxygène est souvent exécuté.

Pour le fonctionnement de l'arc sous l'eau on utilise un courant continu ; les câbles, les porte-électrodes et les corps d'électrodes comportent un isolement parfaitement étanche.

CHAPITRE II

EMBOUTISSAGE DES MÉTAUX

1. GÉNÉRALITÉS

L'emboutissage est une déformation plastique, qui consiste en la mise en forme d'une feuille de métal (souvent plane) convenablement découpée et appelée *flan*, en une pièce plus ou moins creuse et de surface non développable, au moyen d'un outillage spécial monté sur une presse.

En théorie, cette déformation s'effectue à surface, donc à épaisseur constante. En pratique, ces grandeurs varient un peu, en plus ou en moins, autour de leur valeur initiale.

Les pièces embouties sont nombreuses et de formes très variées ; cependant, on peut les classer en deux grandes catégories :

— Celles dans lesquelles la paroi est perpendiculaire au flan, le fond étant ou non mis en forme. Dans celles-ci la tôle est constamment maintenue, pendant toute la durée de l'opération, entre le *poinçon*, à la forme intérieure de la pièce, et la *matrice*, à la forme extérieure ; on peut qualifier cet emboutissage de *guidé*. Ce terme est d'ailleurs synonyme de l'appellation courante « emboutissage profond », expression mal choisie, car pouvant s'appliquer à des pièces très peu profondes avec parois courtes, mais verticales. Dans cette catégorie, on peut encore distinguer l'emboutissage cylindrique de révolution, le plus simple car le plus symétrique, et l'emboutissage de forme, relatif notamment aux pièces carrées, rectangulaires, ovales, etc.

— Celles qui ne comportent pas de paroi perpendiculaire au flan et pour lesquelles la tôle n'est jamais pincée entre poinçon et matrice : c'est l'emboutissage *non guidé*. Sont justiciables de cette catégorie certaines pièces de type conique, comme les hémisphères qui se font sur serre-flan plan, et les pièces complexes du type carrosserie automobile, pour lesquelles le serre-flan est très souvent balancé, c'est-à-dire galbé.

1.1. Avantages de l'emboutissage

1.1.1. Bas prix de revient. — L'outillage d'exécution une fois réalisé et mis au point, il suffit d'une main-d'œuvre de qualité très ordinaire pour assurer le fonctionnement ou simplement la surveillance de *presses* fréquemment pourvues de dispositifs d'alimentation semi-automatique ou automatique. Les cadences de production, voisines de 100 à 200 pièces par heure pour les grosses pièces de carrosserie automobile, par exemple, dépassent souvent 500 pièces par heure pour les pièces de petite taille, et atteignent fréquemment 3 000 à 4 000 pièces par heure avec les presses à amenage automatique ou à plateau revolver.

1.1.2. Interchangeabilité des pièces. — Les pièces embouties, découpées, percées avec le même outillage — aux faibles tolérances d'usinage près — peuvent être remplacées sans aucun ajustage. Des contrôles par prélèvements, en cours de fabrication, sont généralement suffisants pour assurer toutes garanties d'interchangeabilité.

1.1.3. Caractéristiques mécaniques élevées. — L'écrouissage résultant des déformations imposées à la tôle donne à celle-ci des caractéristiques supérieures à ses caractéristiques d'origine (augmentation de la charge de rupture, de la limite élastique et de la dureté superficielle, diminution des allongements).

La possibilité d'utiliser des tôles à caractéristiques plus élevées que celles du métal coulé et l'augmentation de ces dernières par l'écrouissage permettent d'importantes réductions des épaisseurs minimales exigées en fonderie ; cela se traduit par des *allégements importants*.

1.1.4. Présentation. — L'aspect lisse et la propreté facile à obtenir des surfaces des pièces embouties diminuent le coût très élevé des opérations de finition, en particulier du polissage. L'aspect des pièces embouties est toujours supérieur à celui des pièces coulées ; la peinture, les recouvrements chimiques ou électrolytiques se font plus facilement sur pièces embouties que sur pièces fondues et ont un rendement meilleur au point de vue présentation.

Toutefois, ces différents gains ne peuvent être réalisés qu'au prix d'outillages coûteux, souvent délicats à exécuter et à mettre au point, et de machines d'un prix élevé. Il en résulte qu'*il faut nécessairement des séries importantes de pièces pour permettre l'amortissement des outillages et du matériel.*

2. ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE

Nous étudierons d'abord le phénomène sur le type d'emboutissage le plus simple, celui d'une pièce cylindrique de révolution, exécutée sans serre-flan. Il consiste à enfoncer, à l'aide d'un poinçon aux dimensions intérieures de la pièce, une tôle plane, appelée *flan*, dans une cavité creuse, la matrice, aux cotes extérieures de la pièce à obtenir (fig. II-1).

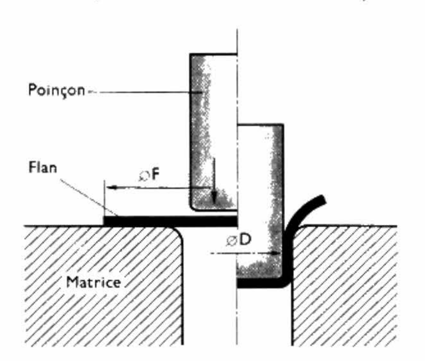


Fig. II-1

Emboutissage sans serre-flan
Moitié gauche : position initiale de l'ensemble
Moitié droite : position des éléments pendant l'emboutissage

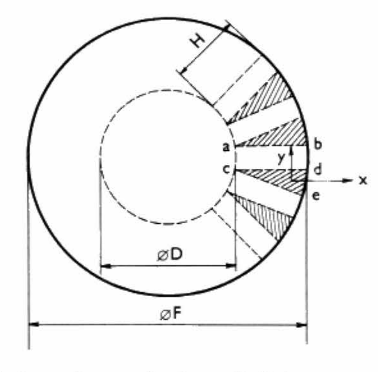


Fig. II-2

Emboutissage cylindrique : répartition du métal

Sur le flan schématisé en plan sur la figure II-2, le centre de diamètre D qui formera le fond de l'embouti n'est pas déformé par l'opération. Pour le formage des parois latérales, on peut songer à découper sur la surface annulaire du flan de petits rectangles tels que *abcd* qui, pliés à la base, donneraient la pièce finie. Il subsiste alors des petits triangles de métal en excédent tels que *cde* ; c'est cet excédent de métal (positif ou négatif, suivant la forme de la pièce) qui caractérise la difficulté de l'emboutissage.

D'ailleurs, nous remarquons également sur la figure II-2 que le périmètre πF du flan deviendra, après emboutissage, πD, valeur beaucoup plus faible. Ce rétreint de la longueur du contour du flan s'accompagne normalement de la formation de plis. L'on conçoit d'ailleurs aisément que ces plis auront une amplitude croissante depuis le diamètre D de l'embouti ; elle sera maximale à la périphérie du flan.

L'embouti sera d'autant plus difficile à obtenir que l'amplitude maximale des plis sera plus grande, c'est-à-dire que la hauteur du triangle sur la figure II-2 sera plus grande, ou que le diamètre F du flan sera plus grand, tout au moins par rapport au diamètre D de l'embouti. Cette difficulté de l'emboutissage pourra donc être repérée par le rapport de rétreint du contour extérieur du flan :

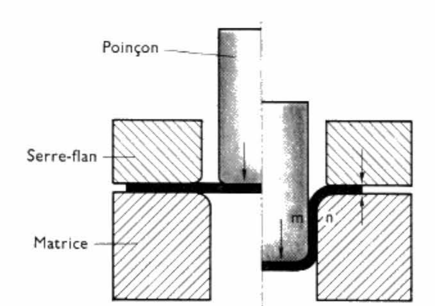
$$\frac{\pi F}{\pi D} = \frac{F}{D}$$

Ce quotient est appelé généralement *rapport d'emboutissage*. En France, on utilise souvent le rapport inverse $\frac{D}{F}$, appelé ***coefficient d'emboutissage***, qui est plus facile à utiliser dans les calculs, ce coefficient étant d'autant plus faible que l'emboutissage est plus difficile.

Revenons au petit triangle de métal en excédent sur la figure II-2 et considérons que celui-ci pourrait tendre à se déplacer suivant trois axes rectangulaires. A priori, dans un outillage comme celui indiqué sur la figure II-1, rien n'empêche le métal annulaire du flan de se déplacer dans le sens perpendiculaire au plan de la figure , en donnant par rétreint les plis dont il est fait mention plus haut. Un moyen simple pour l'en empêcher consiste à utiliser un outillage avec serre-flan, comme celui schématisé figure II-3, dans lequel le serre-flan a pour effet de serrer plus ou moins fortement la tôle contre la matrice. Le métal ne pouvant donc s'échapper dans le sens perpendiculaire au plan de la figure II-2 pourra, évidemment, et rien ne l'en empêche, se déplacer dans le sens x ; il en est vraiment ainsi et la hauteur réelle d'une pièce emboutie sera toujours légèrement supérieure à la hauteur calculée. Il pourra également

Fig. II-3

Emboutissage sur serre-flan plan



se déplacer dans la direction y, mais, dans celle-ci, il sera freiné par la présence du métal des rectangles.

De façon simpliste, l'emboutissage sous serre-flan consiste à appliquer au métal des triangles en excédent des forces de compression tangentielles dues à l'emboutissage et une compression perpendiculaire qui interdit au métal toute déformation hors de son plan. C'est la plus ou moins grande résistance du métal aux forces de compression tangentielle, c'est-à-dire la plus ou moins grande facilité qu'aura le contour extérieur πF du flan à se rétreindre à la longueur πD qui caractérise la capacité de rétreint du métal, probablement la plus importante des caractéristiques du métal au point de vue de son aptitude à l'emboutissage.

D'autres caractéristiques intrinsèques du métal sont importantes pendant l'opération d'emboutissage.

À titre général, les diverses *contraintes* qui peuvent s'exercer dans un embouti quelconque sont schématisées à gauche de la figure II-4 :

— sous le nez du poinçon ayant la forme d'une calotte, une extension biaxée à partir du pôle ;

— dans la zone du rayon de poinçon, un pliage sous tension ;

— dans les parois verticales déjà formées, une traction uniaxiale (non pure, car se mêlant à des phénomènes de frottement) ;

— dans le zone du rayon de matrice, un double pliage sous tension ;

— enfin, dans la zone encore sous serre-flan, des contraintes biaxées de traction radiale et de compression tangentielle, dont la résultante est le phénomène de rétreint évoqué ci-dessus.

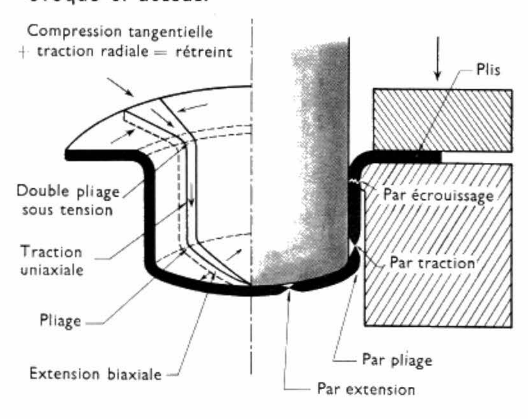


Fig. II-4 — Emboutissage cylindrique : analyse des contraintes

À la considération de ces contraintes, il faut ajouter la notion d'écrouissage dû à la déformation à froid du métal.

Le pourcentage d'écrouissage en un point déterminé dépend de la nature du métal et de son aptitude à s'écrouir mais aussi de l'amplitude de la déformation subie par ce point depuis l'instant initial.

Rappelons que cet écrouissage augmente la résistance à la rupture et beaucoup plus la limite élastique qui se rapproche ainsi de la résistance à la rupture ; en même temps les coefficients d'allongement diminuent.

De cette analyse des contraintes, on déduit les caractéristiques d'emboutissabilité d'un métal idéal : celui-ci doit posséder une résistance à la rupture très élevée pour résister à la traction uniaxiale, une limite élastique faible (car dans le domaine plastique, les contraintes exercées, tout en étant les plus faibles possibles pour éviter les ruptures, doivent tout de même être supérieures à la limite élastique), des allongements importants, une faible résistance à la compression tangentielle sous le serre-flan (c'est-à-dire une bonne aptitude au rétreint). Le matériau doit présenter également un taux d'écrouissage faible avec la déformation de façon que la malléabilité du métal se maintienne pendant tout le formage de l'embouti ; les métaux usuels possèdent plus ou moins ces caractéristiques mécaniques.

3. MESURE DES CONTRAINTES

3.1. Essai de traction sur tôles et feuillards en acier (norme française A-03 160) **d'épaisseur égale ou supérieure à 0,5 mm et inférieure à 3 mm.** — L'essai consiste à soumettre une éprouvette, de section normalisée, à un effort de traction, généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs des caractéristiques mécaniques énumérées ci-après, en général l'essai doit être effectué à la température ambiante.

La longueur entre repères portée sur l'éprouvette est, à un instant donné de l'essai, la longueur de la partie prismatique de l'éprouvette sur laquelle doit être mesuré l'allongement; on distingue en particulier:

— *la longueur initiale entre repères:* longueur entre repères avant l'application de la charge;

— *la longueur ultime entre repères:* longueur entre repères après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, ses deux fragments étant rapprochés soigneusement de manière que leurs axes soient dans le prolongement l'un de l'autre;

— *l'allongement après rupture A (pourcentage) :* allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture exprimée en pourcentage de la longueur initiale entre repères.

Sans vouloir mentionner les différentes charges mesurables: charge ultime, charge à la limite apparente d'élasticité, citons toutefois la résistance à la traction R (ou résistance à la rupture) qui est le quotient de la charge maximale par la section initiale de l'éprouvette, c'est-à-dire la charge unitaire correspondant à la charge maximale (V. t. 3, Métaux et alliages, chap. 1, § 4.4).

L'essai de traction peut fournir deux renseignements supplémentaires en introduisant les notions essentielles de coefficient d'anisotropie et de coefficient d'écrouissage.

On définit le coefficient d'anisotropie r_x dans la direction x comme le rapport de la déformation rationnelle en largeur à la déformation rationnelle en épaisseur d'une éprouvette de direction x et l'on écrit mathématiquement:

$$r_x = \frac{\log_{10} \frac{l_0}{l}}{\log_{10} \frac{e_0}{e}}$$

relation dans laquelle l_0 et e_0 sont la largeur et l'épaisseur initiales de l'éprouvette, l et e la largeur et l'épaisseur après un certain allongement permanent mais avant striction; r_x est compris en pratique entre 0,3 et 2.

Plus les coefficients d'anisotropie d'une tôle sont élevés, plus la réduction d'épaisseur est faible par rapport au rétrécissement en largeur et l'on conçoit qu'une tôle, qui n'a pas tendance à s'amincir, n'a pas tendance à casser, donc permet des performances d'emboutissage meilleures qu'une tôle à coefficient d'anisotropie faible, encore faut-il que les coefficients d'anisotropie mesurés dans les différentes directions du plan de la tôle soient à peu près égaux.

Le coefficient d'écrouissage n est tiré de la relation expérimentale exprimant mathématiquement la courbe de traction:

$$\frac{F}{S} = K \left(\log_e \frac{L}{L_0}\right)^n \quad \text{avec} \quad \frac{L}{L_0} = \frac{S_0}{S}$$

F étant la charge appliquée à un instant donné, S et L la section et la longueur entre repères de l'éprouvette à cet instant et S_0 et L_0 leurs valeurs initiales.

Ce coefficient caractérise en quelque sorte le comportement du matériau dans le domaine plastique, il donne l'allure de la courbe de traction, il mesure également le taux d'écrouissage en fonction de la déformation.

3.2. Essais de dureté. — Ils ont pour but de déterminer la résistance opposée par un matériau à la pénétration d'un corps plus dur. Nous ne rappellerons ici que les valeurs approximatives de conversion entre ces différents essais et ceux de résistance à la traction (V. t. 3, Métaux et alliages, chap. 1, § 4.4).

Dureté Brinell H_B (1) (P = 30 D²)	Dureté Rockwell H_{RB} (1)	Dureté Vickers H_V (2) (P = 30 kg)	Résistance à la rupture (R) en hectobars
80	36,4	80	28
85	42,4	85	30
90	47,4	90	32
95	52	95	33
100	56,4	100	35
105	60	105	37
110	63,4	110	39
115	66,4	115	40
120	69,4	120	42
125	72	125	43
130	74,4	130	45
135	76,4	135	47
140	78,4	140	48
145	80,4	145	50
150	82,2	150	51
155	83,8	155	53
160	85,4	160	55
165	86,8	165	56
170	88,2	170	58
175	89,6	175	60
180	90,8	180	62
185	91,8	185	63
190	93	190	65
195	94	195	67
200	95	200	68
205	95,8	205	70
210	96,6	210	72
215	97,6	215	73
220	98,2	220	75
225	99	225	77

(1 hbar = 1 daN/mm² = 10 MPa); (1) hectobars; (2) nombre abstrait.

3.3. Principaux essais d'emboutissage des tôles. — Ils sont destinés à mesurer l'aptitude des tôles à la déformation, dans les conditions de l'emboutissage (V. t. 3, Métaux et alliages, chap. 1, § 4.4).

4. POSSIBILITÉS D'EMBOUTISSAGE DES MÉTAUX

Elles se rattachent à la possibilité maximale de déformation qu'il est possible de leur faire subir sans crique, ni déchirure, en une opération de presse. Elles n'ont qu'un caractère relatif et dépendent notamment de la forme de la pièce. Pour les situer, et même les chiffrer, on a choisi l'embouti type le plus simple: la pièce cylindrique de révolution.

Pour cette pièce cylindrique, le rétreint maximal se situe sur le contour extérieur du flan dont la longueur initiale πF devient πD. Plus cette longueur initiale πF sera grande devant πD, plus le métal pourra être considéré comme facile à emboutir. On repère donc la capacité d'emboutissage cylindrique d'un métal par le rapport de ces deux quantités, c'est-à-dire le rapport d'emboutissage $\frac{F}{D}$ qui caractérise la grandeur du rétreint subi par le matériau dans l'opération considérée.

Pour les opérations de reprise, les possibilités intrinsèques du matériau pourront également être repérées, de la même façon, par le rapport d'emboutissage de $n^{\text{ième}}$ passe, quotient du diamètre de l'embouti de la passe précédente et du diamètre de l'embouti de la $n^{\text{ième}}$ passe. Pour ces opérations de reprise, on considère aussi le coefficient de réduction de $n^{\text{ième}}$ passe égal à:

$$\frac{D_n}{D_{n-1}}$$

L'expérience montre que le rapport d'emboutissage cylindrique en première passe dépend de nombreux facteurs qui, a priori, et de façon non limitative, sont les suivants: la nature du matériau, le diamètre de l'embouti D, l'épaisseur du métal e, le rayon d'entrée de la matrice R_M, le rayon de

tête du poinçon R_P ou la forme de cette tête, le jeu diamétral entre matrice et poinçon $2J$, la vitesse d'emboutissage V, la nature du lubrifiant, la valeur de l'effort spécifique de pression de serre-flan, la température du flan et de l'outillage, etc. Le but des essais exécutés est d'étudier l'influence de ces divers paramètres.

4.1. Influence de la nature du métal. — Il est évident que la nature du métal a une influence très sensible sur le rapport d'emboutissage. Toutefois, comme on peut s'en rendre compte aisément par expérience, ce n'est pas forcément le métal le plus malléable qui permet le plus grand rapport d'emboutissage, c'est-à-dire le maximum de réduction, car il doit aussi présenter un minimum de résistance.

Dans certaines conditions d'emboutissage bien déterminées ($D = 248$ mm, $e = 1$ mm, $R_M = 6e$, $R_P = 10e$, $J = e$, $V = 2$ m/mn, lubrifiant: suif, température ambiante), il a été déterminé pour chacun des métaux les plus courants le plus grand flan qu'il était possible d'emboutir et, à partir de ce résultat, on a calculé les rapports maximaux d'emboutissage. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau I

Classement	Métal	État	F_{max} (mm)	$\frac{F}{D}$	$\frac{D}{F}$
1	U-Z30	recuit	520	2,10	0,477
1	Cuivre	recuit	520	2,10	0,477
3	A-G3	recuit	515	2,08	0,481
4	A-U4G	recuit	505	2,04	0,491
4	A5	quart dur	505	2,04	0,491
6	Acier	AB-SSEDD	495	2	0,500
7	A5	recuit	490	1,98	0,506
7	A-SG	recuit	490	1,98	0,506
9	A-G1	recuit	465	1,87	0,533

4.2. Influence du diamètre. — L'expérience et le raisonnement permettent d'affirmer que le diamètre D de l'embouti a une certaine influence sur le rapport d'emboutissage $\frac{F}{D}$; celui-ci diminue lorsque, toutes choses égales par ailleurs, le diamètre D augmente.

Panknin a étudié l'influence du diamètre de l'embouti sur le rapport d'emboutissage et a montré, aussi bien expérimentalement que par le calcul, que la multiplication du diamètre du poinçon par deux, par exemple, exerce le même effet sur les conditions de l'emboutissage qu'une diminution de moitié de l'épaisseur de la tôle. Donc, comme nous le verrons ci-après, pour une épaisseur de métal donnée, plus le diamètre du poinçon est grand, plus le rapport d'emboutissage diminue.

4.3. Influence de l'épaisseur du métal. — Cette influence a été étudiée expérimentalement en déterminant, dans des conditions identiques, le rapport d'emboutissage pour des tôles ayant trois épaisseurs différentes, $e = 0,5$, 1 et 2 mm. L'influence de l'épaisseur du métal sur le rapport d'emboutissage varie avec la nature du métal lui-même, de sorte que le classement des alliages indiqué au tableau I varie lui aussi avec l'épaisseur. Les résultats des essais, exécutés dans des conditions identiques ($D = 248$ mm, $R_M = 6e$, $R_P = 10e$, $J = e$, $V = 2$ m/mn, lubrifiant: suif, température ambiante), sont résumés dans le tableau II qui donne la capacité d'emboutissage $\frac{F}{D}$ en fonction de la nature et de l'épaisseur du métal.

Ce tableau permet de tirer les conclusions suivantes:

— le classement des divers matériaux, quant à leur capacité d'emboutissage cylindrique, dépend notamment de l'épaisseur du métal;

— la capacité d'emboutissage, ou plutôt la performance d'emboutissage cylindrique des divers matériaux, augmente en même temps que l'épaisseur du métal, mais semble passer par un maximum pour une épaisseur le plus souvent supérieure à 2 mm.

Au sujet de l'influence de l'épaisseur du métal sur la capacité d'emboutissage, Panknin a publié des études théoriques et expérimentales très intéressantes. Il explique la déchirure du fond de l'embouti, qui caractérise la capacité maximale d'emboutissage, par le fait que l'effort transmis par le fond devient plus petit que celui nécessaire à la déformation du matériau sous le serre-flan. Or, l'effort nécessaire à l'emboutissage P est la somme des forces élémentaires suivantes:

— l'effort d'emboutissage si l'opération avait lieu sans perte: P_0;

— les pertes par le frottement du métal entre la matrice et le serre-flan: P_1;

— les pertes par frottement dans le rayon de matrice: P_2;

— les pertes par pliage au moment de la sortie de l'embouti du rayon de matrice: P_3.

Quand l'épaisseur de la tôle est divisée par deux, par exemple, alors, le volume à déformer devient de moitié moins grand et l'effort de déformation sans perte P_0 diminue également de moitié. Il en est de même des pertes par pliage. Quant aux pertes par frottement, elles se comportent différemment: les pertes P_1 par frottement entre serre-flan et matrice ne sont pas modifiées si l'épaisseur de la tôle change; quant aux pertes P_2 par frottement dans le rayon de matrice, elles diminuent un peu en général quand l'épaisseur de la tôle diminue, mais d'une façon non linéaire. Il en ressort donc que l'effort d'emboutissage de la tôle d'épaisseur moitié est plus grand que la moitié de l'effort d'emboutissage de la tôle d'épaisseur de référence. Comme la résistance du fond de l'embouti est exactement proportionnelle à l'épaisseur de la tôle, le raisonnement montre bien que le rapport d'emboutissage doit décroître quand l'épaisseur diminue. Cela provient du fait que, dans l'effort nécessaire à l'emboutissage, la traction due au frottement augmente lorsque l'épaisseur de la tôle diminue.

Poursuivant des études expérimentales dans ce domaine, Panknin a montré que le rapport maximal d'emboutissage reste constant quand le rapport du diamètre du poinçon à l'épaisseur de la tôle reste, lui aussi, constant. Ce serait donc ce rapport $\frac{D}{e}$ qui caractériserait la difficulté de l'opération d'emboutissage. Expérimentalement, Panknin a déterminé la relation entre $\frac{D}{e}$ et $\frac{F}{D}$ (fig. II-5), qui semble linéaire. Cette loi ouvre une possibilité de similitude pour des grandeurs différentes, donc la voie aux modèles réduits.

Tableau II

Épaisseur		0,5 mm		1 mm		2 mm	
Métal	État	Classement	$\frac{F}{D}$	Classement	$\frac{F}{D}$	Classement	$\frac{F}{D}$
Cuivre	recuit	2	1,98	2	2,10	4	2,09
U-Z30	recuit	1	2,02	1	2,14	1	2,18
Acier	AB-SSEDD	3	1,89	6	2	4	2,09
Inoxydable 18/8	recuit	3	1,89	4	2,04	3	2,12
A5	recuit	6	1,85	7	1,98	7	2,07
A5	demi-dur	7	1,75	5	2,02	4	2,09
A-G3	recuit	3	1,89	3	2,08	2	2,14

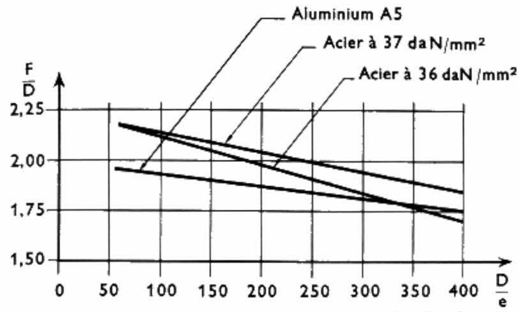


Fig. II-5 — Variation du rapport d'emboutissage avec le diamètre et l'épaisseur, d'après Panknin

5. MATIÈRES D'EMBOUTISSAGE

5.1. Les aciers. — La technique moderne du laminage permet d'obtenir actuellement des tôles d'acier très minces avec des tolérances rigoureuses, une surface propre et lisse, un grain fin, une structure homogène et une gamme de très bonnes caractéristiques mécaniques s'adaptant aux nécessités imposées par des opérations d'emboutissage difficiles.

On classe les tôles :

— d'après leurs caractéristiques d'emboutissage : tôle de fabrication courante TC, tôle d'emboutissage E, tôle d'emboutissage spéciale ES ;

— d'après l'aspect de la surface (en ce qui concerne E et ES) : qualité X pour laquelle il est admis une légère coloration, de faibles rayures et de légères gravelures, qualité Z dont la face considérée comme visible est pratiquement sans défaut.

Cette classification permet d'obtenir quatre combinaisons comme le montre le tableau suivant :

	E	ES
X	XE	XES
Z	ZE	ZES

Caractéristiques mécaniques relatives à ces tôles :

	Résistance à la rupture (décanewtons par millimètre carré)	Allongement	Dureté Rockwell B
TC	42	24 %	65
E	38	30 %	57
ES	35	36 %	50

Les aciers inoxydables. — Au cours des opérations d'emboutissage et d'étirage, les aciers inoxydables se comportent différemment de l'acier doux en raison de la présence de chrome et de nickel. On utilise des formules spéciales pour calculer les jeux ainsi que les pourcentages de réduction entre chaque passe. Les vitesses d'emboutissage doivent être plus lentes que pour l'acier, le métal s'écrouissant plus rapidement.

5.2. Les alliages non ferreux

Les laitons. — Les plus courants sont ceux désignés sous les noms : 60/40 avec addition de plomb pour les utilisations en horlogerie, et sans addition de plomb pour les pièces d'optique, de serrurerie, d'ameublement ; 65/35 pour l'emboutissage et le repoussage et 72/28 pour l'emboutissage extra-profond.

La qualité 72/28, c'est-à-dire 72 % de cuivre et 28 % de zinc, est employée pour l'étirage de cartouches et douilles d'obus ; elle permet de réduire au minimum le nombre d'opérations de recuit.

L'aluminium et ses alliages. — Du fait que ces alliages s'écrouissent à l'emboutissage, l'étirage le plus profond ne s'obtient qu'avec les qualités les plus douces ou extra-douces ; on peut toutefois obtenir des emboutis peu profonds avec les qualités les plus dures.

Le cuivre. — S'il n'est pas allié à un autre élément, le cuivre rouge possède d'excellentes qualités d'emboutissage et d'étirage, souvent supérieures à celles du laiton ou de l'acier spécial aux emboutissages extra-profonds.

Le zinc. — Il s'emboutit facilement, mais ne s'étire pas au même point que les autres métaux. Le pourcentage de réduction du diamètre entre chaque passe est inférieur à celui pratiqué pour l'acier. Dans le cas d'emboutissage de formes complexes, il est nécessaire de le chauffer à une température variant entre 100 et 150 °C.

Le nickel et ses alliages. — Ils possèdent d'excellentes qualités d'emboutissage. Le maillechort, alliage utilisé couramment, contient environ 60 à 65 % de cuivre, 20 % de zinc et 15 à 20 % de nickel.

Le magnésium. — C'est le plus léger des métaux utilisés dans l'industrie. À la température ambiante, le magnésium ne peut être embouti que jusqu'à certaines limites. Pour réaliser des emboutissages semblables à ceux qu'il est possible d'obtenir avec l'acier, on doit chauffer les flans ; les températures favorables s'échelonnent, suivant les qualités et les formes à obtenir, entre 200 °C et 500 °C. Pour des opérations peu profondes et sur forme simple on peut opérer vers 180 °C afin que l'action de la chaleur n'entraine pas une diminution trop grande de la résistance à la traction.

Le titane. — Dans l'emboutissage, le titane se comporte à peu près comme le magnésium ; les flans doivent être chauffés à une température comprise entre 200 °C et 350 °C, selon qu'il s'agit de titane pur ou d'un alliage.

On chauffe également, au moyen de résistances électriques, les poinçons et matrices afin d'éviter le choc thermique auquel le métal est sensible.

5.3. Le recuit. — Ce sont essentiellement les parois latérales (ou douille) qui ont besoin d'être régénérées avec leurs qualités primitives pour qu'il ne subsiste pas de tension moléculaire ; il en est de même pour la collerette car c'est la partie qui s'écrouit le plus.

Les températures de recuisson des principaux métaux et alliages subissant des opérations d'emboutissage sont indiquées ci-après.

Tôles à indices .... 750 °C
Aciers inoxydables .... 750 à 1150 °C
Nickel .... 500 °C
Cuivre .... 650 °C
Laitons .... 700 à 750 °C
Aluminium A9 .... 300 °C
Alliage A5 .... 400 °C
Zinc .... 150 à 200 °C
Or et argent .... 650 °C

Pour certains alliages d'aluminium des familles A-SG et A-U4G ainsi que pour certains alliages cuivreux, les emboutissages se font sur métal recuit, les pièces formées doivent alors subir une trempe afin que le métal présente les caractéristiques mécaniques que l'on escompte ; par exception, l'alliage A-SG peut être embouti à l'état trempé en une seule passe cylindrique.

5.4. Résistance à la traction (*R*) de différents métaux (en hectobars). — Les valeurs ci-après sont données à titre purement indicatif car, pour la plupart des métaux, notamment l'étain, le plomb et le zinc, les charges de rupture ainsi que les allongements varient suivant la vitesse de traction.

Métal

A4 recuit 8
A4 demi-dur 12
A5 recuit 7,5
A5 demi-dur 11
A99 raffiné demi-dur 9
AM recuit .... 9 à 12

A-G3 recuit	20 à 23
A-G5 recuit	30 à 32
A-SG recuit	11 à 12
A-SG normal	22 à 24
A-U4G recuit	18 à 23
A-U4G normal	40 à 44
Cuivre laminé doux	17
Cuivre laminé dur	26
Étain laminé	3,5
Fer blanc	35
Laiton laminé doux	23
Laiton laminé 1/4 dur	28
Laiton demi-dur	31
Laiton extra-dur	38
Plomb	2.6
Zinc, flans pour emboutissage	11
Zinc, laminé dur	14
Zinc, flans commerciaux	13
Tôles d'acier à 0,10 % de carbone	30
Tôles d'acier à 0,15 % de carbone	35
Tôles d'acier à 0,20 % de carbone	38
Tôles d'acier à 0,25 % de carbone	42
Tôles d'acier à 0,30 % de carbone	44
Tôles d'acier à 0,40 % de carbone	51
Tôles d'acier à 0,50 % de carbone	58
Tôles d'acier à 0,75 % de carbone, laminé à chaud	55
Tôles d'acier à 0,95 % de carbone	57
Acier inoxydable doux	53

6. LUBRIFICATION

La lubrification des flans destinés à être emboutis a une très grande importance dans la réussite des opérations, particulièrement pour les opérations d'étirage des parois, les éléments poinçon et matrice supportant une grande fatigue puisqu'aucun jeu n'existe entre eux. Le but du graissage des flans est la formation d'une pellicule lubrifiante facilitant l'écoulement de la matière, tout en protégeant les surfaces en contact avec les parois du poinçon et de la matrice, et particulièrement les entrées de cette dernière.

Pour augmenter l'action du film lubrifiant, il est recommandé, lors d'emboutissages difficiles, de cuivrer légèrement les surfaces de travail de certains outils en les plongeant dans un bain de sulfate de cuivre. Cette méthode, alliée à une lubrification appropriée, contribue à augmenter sensiblement la longévité des outils.

La méthode du cuivrage est également pratiquée sur des emboutis au cours des opérations de réduction de diamètre (opérations d'étirage) ; elle donne la possibilité de procéder à deux ou trois réductions de diamètre dans un outil à matrices étagées.

Le produit de graissage doit toujours être appliqué sur le flan à emboutir ou sur l'embouti à étirer.

Produits lubrifiants

Pour les aciers d'emboutissage :

— lubrifiants solubles dans l'eau utilisés pour les emboutissages faciles et peu profonds, dilués en proportions variables suivant l'opération : huile minérale et additifs extrême pression. Il est à noter que l'emploi de ce genre de lubrifiant maintient l'outil d'emboutissage en service dans son état de propreté originale et il constitue une protection antioxydante pour les pièces embouties ;

— lubrifiants non solubles utilisés pour les emboutissages difficiles et profonds : huile minérale et additifs sulfochlorés ou huiles animales.

Pour les aciers inoxydables : lubrifiants utilisés à l'état pur et se composant d'une base minérale et d'additifs chlorés lui conférant des qualités de filmo-résistance élevée.

Pour le cuivre et ses alliages : lubrifiants solubles se composant d'une base végétale et d'additifs évitant la formation de taches sur les produits emboutis.

Pour l'aluminium et ses alliages : lubrifiants utilisés, en général, à l'état pur, de faible viscosité contenant des additifs de grande filmo-résistance (huiles végétales).

Pour les pièces en zinc : on emploie des graisses animales : suif de bœuf, de mouton ou du suint.

Pour les aciers au nickel, le magnésium et le titane : on utilise du suif avec plusieurs parties d'huile de ricin ou de l'huile de lin avec 5 % de soufre.

7. MATIÈRES POUR LA CONSTRUCTION DES OUTILS

7.1. Les aciers. — Les outils d'emboutissage, d'étirage, de matriçage et d'estampage qui travaillent par choc ou par refoulement imposent un choix d'acier admettant les pressions, les chocs et l'échauffement continu. On emploie des aciers au chrome-vanadium, au chrome-nickel autotrempants avec parfois des additions de molybdène, ainsi que des alliages au tungstène. Les formes de grandes dimensions, réalisées en acier, sont constituées d'éléments assemblés dans un cadre, ce qui permet d'employer des aciers spéciaux qui ne sont traités thermiquement que dans les zones exposées à la fatigue.

Pour les petits et moyens emboutis, toutes les opérations exigent des poinçons et des matrices résistant à l'usure et aux chocs. Comme pour les outils de découpage, on emploie des aciers au carbone et à haute teneur en chrome (symbole Z 200 - C 12). La résistance de cet acier autorise son emploi pour l'emboutissage à chaud. Trois classes d'acier donnent également satisfaction pour l'emboutissage à chaud et pour l'estampage, ce sont les aciers nickel-chrome autotrempants, dont les symboles sont : 45 WC 20-04, 60 NC DV 06 et 35 NCD 14.

Pour travaux lourds et intensifs, on emploie des aciers nickel-chrome au tungstène avec addition de vanadium, de molybdène et de cobalt ; la nuance donnant les meilleurs résultats renferme environ 10 % de tungstène ; elle fournit un grain très fin et un haut degré de dureté superficielle, sa composition chimique est approximativement la suivante : C (0,3 à 0,4 %), Cr (2,75 à 3,25 %), Ni (1 à 1,2 %), W (9 à 10 %), Va (0,4 à 0,5 %), Mo (0,3 à 1 %), Co (2 %).

Cet acier se trempe à l'huile à 1 100 °C environ ; la dureté après le traitement est environ 54 Rockwell C. On doit appliquer une température de revenu légèrement supérieure à la température d'utilisation de l'outil, le revenu doit être effectué lentement, c'est-à-dire à cœur. Cet alliage résiste aux chocs violents et répétés en conservant parfaitement sa trempe malgré un échauffement en service pouvant atteindre 500 °C.

7.2. La fonte à graphite sphéroïdal. — La fonte nodulaire présente les propriétés mécaniques de l'acier coulé, alliées aux qualités de frottement et à la coulabilité de la fonte. Il s'agit d'une fonte grise qui contient du magnésium, avec addition, pour les pièces de fatigue, d'éléments spéciaux tels que le nickel, le chrome et le molybdène (fonte à graphite sphéroïdal, en abrégé fonte G.S.). Cet alliage permet l'obtention de pièces embouties saines de forme complexe ; il a d'excellentes qualités d'allongement et de résistance qui peuvent être développées par traitements thermiques ; comme l'acier, la fonte G.S. se déforme avant de casser.

Les outils en fonte G.S. présentent de nombreux avantages. Tout d'abord, leur prix de revient est généralement plus bas que celui des outils réalisés en d'autres matières ; ensuite, et c'est là leur principal avantage, leurs éléments peuvent être exactement moulés en forme, réduisant ainsi les temps d'usinage qui sont nécessaires pour les outils en acier. Les fontes s'usinent facilement et les prix d'usinage qui concernent l'enlèvement d'une quantité déterminée de métal sont inférieurs au prix d'usinage de l'acier.

En service, la fonte présente des qualités d'autolubrification dues à la présence de graphite libre dans la structure du métal, et, depuis le développement des fontes alliées ou spéciales, les outils peuvent recevoir un traitement thermique total ou un traitement local afin de pouvoir satisfaire à certaines nécessités.

Les fontes nodulaires sont soudables, tant au chalumeau qu'à l'arc et beaucoup plus facilement que la fonte ordinaire ; cela présente un grand intérêt pour la réparation de pièces cassées ou défectueuses. Lorsqu'on demande une grande

dureté à des pièces de fonte, on peut exiger une teneur en alliage permettant d'améliorer l'autodurcissement du métal. Lorsqu'on utilise une pleine trempe ou que l'on applique des méthodes de trempe locale au chalumeau ou par induction, on doit étudier la composition et le traitement préliminaire des pièces de façon à conserver un plein noyau perlitique avant la trempe.

Les caractéristiques de la fonte nodulaire sont :

— charge de rupture à la traction .... 55 à 60 hbar
— allongement .... 3 à 10 %
— dureté Brinell .... 250 à 280 hbar
— dureté après traitement thermique, jusqu'à .... 55 Rockwell C

7.3. Les carbures métalliques. — Les outillages en carbures métalliques adaptés aux presses de découpage et d'emboutissage sont d'un prix plus élevé que le prix des outillages construits en acier à haute teneur de chrome. Un rapport de 4 à 10 est considéré normal pour les deux raisons suivantes :

— le prix des éléments de métal dur est considérablement plus élevé que celui des éléments en acier,
— le temps de construction de l'outil, en raison des moyens mis en œuvre, est également très supérieur au temps nécessaire à la construction d'un outil en acier.

7.4. Les outils en bronze d'aluminium. — Depuis quelques années des alliages d'une homogénéité et d'une compacité remarquables ont été mis au point pour l'emboutissage des aciers inoxydables.

Ces alliages résistent particulièrement à l'usure et présentent des propriétés antifriction exceptionnelles, ce qui évite le phénomène de soudure ou collage sur le rayon de fluage des matrices. Il est évident que le coefficient de friction « acier sur bronze » est nettement inférieur au coefficient de frottement « acier sur acier » ; cela évite le souci de la lubrification des flans.

On les emploie avec satisfaction pour l'emboutissage des aciers inoxydables, des maillechorts et du zinc ; toutefois ils sont déconseillés pour l'emboutissage du cuivre, du bronze, des laitons et de tous autres alliages à haute teneur de cuivre.

7.5. Les outils en alliages à bas point de fusion. — Ces alliages offrent une résistance suffisante pour permettre l'obtention d'un nombre déterminé de pièces et d'un prix de revient le plus bas possible, ce prix étant nettement influencé par certaines caractéristiques des matières employées, telles que facilité d'usinage, déchets minimaux, bas prix de la matière et possibilité de récupération.

La résistance à l'usure de ces alliages est un peu inférieure à celle de l'acier et du même ordre de grandeur que celle de la fonte. Par ailleurs, ces alliages offrent l'avantage d'être récupérables, ce qui abaisse leur prix d'utilisation à une valeur bien inférieure à celle des aciers.

Un de ces alliages est désigné par le symbole kayem 2 :

— point de fusion .... 390-400 °C
— retrait de solidification .... 0,9 %
— résistance à la traction .... 19 hbar
— résistance à la compression .... 68 hbar
— dureté Brinell .... 140-150 hbar

On voit que sur plusieurs points cet alliage supporte la comparaison avec la fonte ordinaire ou l'acier doux ; la résistance à la traction de la fonte grise est comprise entre 18 et 30 hbar.

Ces alliages présentent un certain nombre de propriétés intéressantes :

— facilité d'usinage, de polissage et de soudure (on peut réparer et recharger les outils par soudure oxyacétylénique ou encore par métallisation au pistolet),
— bonne résistance à l'usure et autolubrification, ce qui diminue les risques en cas de lubrification incorrecte ou négligée,
— faible coefficient de frottement,
— absence de grippage ou de rayure, des feuilles d'aluminium en particulier,
— récupération possible à 90 % de l'alliage qui n'est que très faiblement altéré par les fusions successives.

7.6. Les outils en bois densifiés (ou bois bakélisés). — Seule, l'industrie aéronautique construit des outillages de formage en bois densifiés pour la fabrication de panneaux, de cadres et de tous produits en tôles minces (cas de petites séries). Les bois sont lamellés et comprimés ; les feuilles de placage qui les composent sont résinifiées et empilées dans les matrices d'une presse hydraulique et soumises à l'action simultanée de la compression et de la chaleur. La densification est obtenue en même temps que la polymérisation de la résine. Les bois densifiés sont fournis en qualités différentes, les qualités inférieures pouvant être utilisées comme supports ou éléments de remplissage, et ceux de qualités supérieures comme éléments de travail. La masse volumique de ces bois est de 1,4 kg/dm^3.

Les éléments constituant un outil d'emboutissage, par exemple, sont les mêmes que ceux constituant un outillage conventionnel en acier ou en fonte, c'est-à-dire que matrice, serre-flan et poinçon sont de mêmes formes, mais en sections renforcées, environ 50 % en plus. Les semelles porte-poinçon et porte-matrice peuvent être prévues en acier ou même en duralumin.

L'usinage se fait sur machine à bois ; l'assemblage s'effectue par vis à métaux (on taraude directement dans le bois comme il serait fait dans le métal), par collage, par rivets avec rondelles, par boulons et écrous. Les bois densifiés ne peuvent être cloués. Le polissage des faces de travail se fait par les procédés habituels appliqués au bois.

7.7. Outils en matières plastiques. — Ils sont également utilisés dans l'industrie aéronautique pour la construction d'outils de formage et d'emboutissage en petites séries. Il existe plusieurs types de résines thermodurcissables, leurs caractéristiques et leurs propriétés peuvent se résumer comme suit :

— grande facilité de reproduction de formes complexes,
— reproduction fidèle de tous les détails des moules ; la qualité de l'outil ne dépend que de celle du moule de coulée,
— interchangeabilité dans le cas de construction de plusieurs outils,
— possibilité de mouler sur une pièce type ou sur un modèle étalon, lequel peut, par ailleurs, être utilisé comme reproducteur sur machine Keller pour la construction d'un outil pour grandes séries,
— grande vitesse d'usinage du plastique.

Ces propriétés offrent les avantages suivants :

— réduction des temps de construction des outillages,
— réduction du poids des outils et de ce fait, réduction également des moyens de manutention, la masse volumique moyenne du plastique étant de 1,26 kg/dm^3,
— économie de main-d'œuvre.

Ces outils ont toutefois des emplois limités ; l'épaisseur maximale des tôles formées est de 3 mm pour les alliages légers et de 1,5 mm pour les aciers doux.

8. OUTILS D'EMBOUTISSAGE ET DE FORMAGE POUR PIÈCES DE GRAND ENCOMBREMENT ET DE FORMES COMPLEXES (V. fig. II-6 et II-7)

Dans le groupe des emboutis de forme complexe, on considère ceux qui comprennent des surfaces droites avec épaulements, des bossages au fond du corps creux, des zones sphériques ou coniques ou des collerettes non parallèles à la base. Les corps creux cylindriques qui comportent un ou deux méplats sont obtenus sans aucune difficulté ; mais de petites nervures sur les côtés, en creux ou en relief, imposent une opération spéciale à faire après l'emboutissage car un fluage normal du métal sur les arêtes de la matrice est impossible : ces nervures se font par allongement de métal. Les emboutis de forme complexe ou de grande profondeur ne peuvent être réalisés en une seule opération ; ils doivent subir plusieurs étirages dans des outils différents jusqu'à l'obtention des dimensions imposées par le dessin de la pièce.

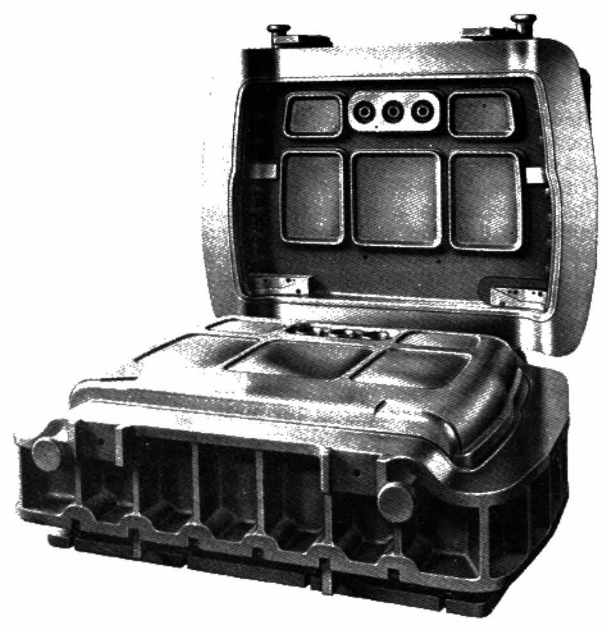


Fig. II-6 — Outil d'emboutissage pour une presse à 4 bielles avec coussins pneumatiques, dans la table, pour l'emboutissage de la cloison arrière d'une cabine tout acier de camion (*Weingarten*)

8.1. Emboutissage sur deux plans. — Ce genre de pièce peut être exécuté sur presses à double action équipées de coussins pneumatiques ou hydropneumatiques en une seule course de coulisseau. Le poinçon de formage fixé au coulisseau-plongeur a nécessairement la forme à produire. Les deux serre-flan indépendants sont réglés au niveau de la face de la matrice ; ils ont une épaisseur dont la différence est égale à la dénivellation du poinçon. L'utilisation de deux serre-flan distincts permet ainsi d'emboutir le plan le plus profond avant que ne commence la descente du second serre-flan ; en d'autres termes on réalise l'emboutissage de la première dépression, puis de la seconde dépression. Une seconde opération de calibrage des côtés ou de frappe des rayons peut être nécessaire. La première opération doit fournir plus de métal qu'il n'est nécessaire, la dernière opération doit renvoyer dans le flan l'excédent de métal.

Sur presse à simple action équipée d'un coussin pneumatique, les pièces embouties sur deux niveaux ne peuvent être faites que par des outillages spéciaux à chaque dénivellation. En général, les emboutissages assez rapprochés, ainsi que toutes dépressions profondes peuvent être faits simultanément si le métal à travailler est assez épais et si les emboutis peuvent se former sans amener le métal de l'extérieur du flan. Pour les métaux minces, chaque embouti doit être fait l'un après l'autre.

8.2. Pièces hémisphériques. — Certains outils d'emboutissage pour pièces hémisphériques comportent un poinçon contractile, afin de faciliter le dévêtissage ; ce genre de poinçon est d'ailleurs obligatoire dans l'emboutissage à chaud. Pour les poinçons hémisphériques monobloc destinés au travail de métaux minces, il est recommandé de sabler légèrement leur sommet afin de limiter l'étirage du métal.

8.3. Fluage irrégulier. — Lorsque des flans plats sont déformés suivant une ligne sinueuse, le métal ne pénètre pas d'une manière égale dans l'espace annulaire entre poinçon et matrice ; de ce fait il a tendance à plisser ou à onduler suivant l'épaisseur et la nature de la matière à travailler et suivant la forme à obtenir. Ces plis ou ces ondulations sont causés par le refoulement d'un excédent de matière dans certaines zones ; dans d'autres zones, la pièce ne pourra être formée sans qu'il y ait un allongement anormal de la matière, donc risque de rupture. Les parties plissées ne pourront pénétrer dans l'espace annulaire, lequel est égal à l'épaisseur du flan augmentée d'un jeu normal. On remédie à ces inconvénients par l'emploi de serre-flan multiples.



Fig. II-7 — Éléments de cabine emboutis (*Sciaky*)

8.4. Joncs de freinage. — Pour des cas difficiles, on adjoint au serre-flan, sur la face de serrage de la matière, des joncs dont le but est de freiner le glissement du métal à travailler. Le profil de ces joncs doit être reproduit sur la face de la matrice avec un jeu égal à l'épaisseur de la matière. Ces joncs peuvent avoir des saillies plus ou moins importantes selon les zones de difficulté. Le métal à emboutir est astreint à suivre une trajectoire qui diffère de sa trajectoire normale.

L'utilisation de joncs impose une consommation de matière importante ; cela est dû aux opérations de détourage qui se font entre le contour de la pièce et les joncs de retenue. Les joncs, dont le relief est situé dans le même sens que celui du poinçon, doivent être situés à une faible distance de l'entrée de la matrice ; on les dispose en général dans les zones de difficulté, le long des côtés convexes ou concaves. On ne peut les utiliser pour des emboutissages profonds car le métal ne pourrait fluer de manière égale.

On donne généralement aux joncs une forme de segment de cercle dont le rayon et la proéminence varient suivant les dimensions de l'outil et l'épaisseur du métal. Dans certaines zones difficiles, il est préférable de munir les serre-flan de jonc double dont la proéminence est faible ; cette méthode augmente obligatoirement la surface de la collerette. *Quel que soit le nombre de joncs, la pression initiale du serre-flan doit permettre leur formage sur la surface du flan avant que le poinçon ne commence son formage*, car toute ondulation est difficile à résorber. On peut les utiliser sur des outils à serre-flan fixe ou à serre-flan élastique, c'est-à-dire sur des presses à double ou à simple action.

8.5. Jeu entre poinçon et matrice. — Pour obtenir une surface emboutie parfaitement lisse, il est nécessaire que l'espace annulaire entre un poinçon et une matrice d'emboutissage soit déterminé en fonction des tolérances maximales affectées à la tôle à travailler.

Dans la pratique on utilise la formule suivante :
Espace annulaire = épaisseur nominale de la tôle + tolérance maximale majorée de 20 %.

Par exemple, pour une tôle d'épaisseur 2 mm avec $\pm$ 0,1 mm de tolérance, l'espace annulaire aura une largeur de :

$$2{,}1 + \frac{0{,}1 \times 20}{100} = 2{,}12 \text{ mm}$$

Cette formule donne satisfaction (sauf pour l'acier inoxydable) à condition que les parties actives de l'outil d'emboutissage soient parfaitement alignées, que le

montage sur la presse soit effectué soigneusement et que le mouvement alternatif du coulisseau de la presse soit parfaitement perpendiculaire à la table de la machine.

9. ÉTUDE DES MÉTHODES D'EMBOUTISSAGE

9.1. Emboutis rectangulaires

On range sous le nom d'emboutis rectangulaires toutes les pièces analogues à une cuvette parallélépipédique, dont la section en plan est un carré, un rectangle ou même un polygone, dont les angles sont plus ou moins arrondis. Généralement, les parois de la cuvette sont parallèles et verticales. S'il n'en était pas ainsi, le problème de l'emboutissage serait compliqué, de la même façon que pour les emboutis circulaires coniques.

Le point délicat des pièces rectangulaires est la formation des angles. En effet, dans une pièce rectangulaire on peut, à première vue, considérer qu'il y a pliage du flan sur les deux longueurs et largeurs, ainsi qu'un quart d'embouti circulaire de révolution dans chaque angle (fig. II-8). C'est donc dans les angles que le métal doit se rétreindre, d'où augmentation éventuelle de l'épaisseur, ce qui a tendance à donner des plis ou un laminage entre poinçon et matrice, avec des risques de déchirure.

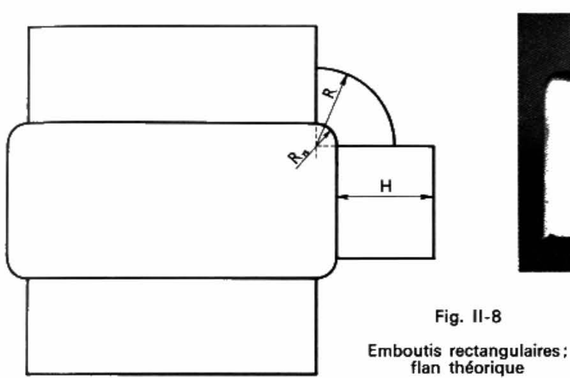


Fig. II-8

Emboutis rectangulaires ; flan théorique

9.1.1. Détermination du flan. — La détermination des flans des emboutis rectangulaires ne peut s'exécuter que par essais. Il n'y a pas de méthode sûre pour déterminer d'avance le contour du flan d'une telle pièce. On a même pu réaliser deux emboutis, l'un en acier et l'autre en alliage d'aluminium, pour lesquels les deux flans n'avaient ni la même dimension, ni le même contour : ce fait s'explique très bien par les différences essentielles entre le travail de ces deux matériaux.

Les différentes méthodes proposées (méthode allemande A.W.F., divers tracés de Wassilieff, tracés Zvorono) consistent à remplacer le tracé du contour du développement du parallélépipède, augmenté d'un quart d'embouti circulaire de révolution dans chaque angle, par un autre contour (fig. II-9, 1 ou 2) qui, nous le rappelons, ne doit être rendu définitif qu'après expérimentation.

Notons, d'ailleurs, que Wassilieff recommande, pour un embouti carré, un flan circulaire de diamètre :

$$F = d + 2\,H.$$

d étant le côté du carré et H sa hauteur.

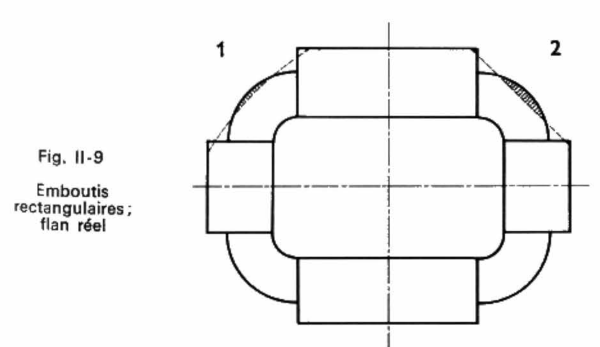
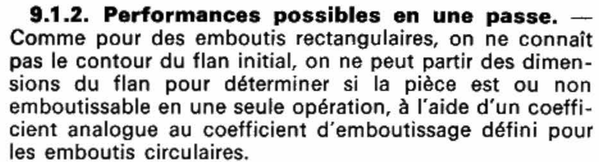


Fig. II-9

Emboutis rectangulaires ; flan réel



9.1.2. Performances possibles en une passe. — Comme pour des emboutis rectangulaires, on ne connaît pas le contour du flan initial, on ne peut partir des dimensions du flan pour déterminer si la pièce est ou non emboutissable en une seule opération, à l'aide d'un coefficient analogue au coefficient d'emboutissage défini pour les emboutis circulaires.

La règle communément citée relie la hauteur H de l'embouti et le rayon d'angle R_n (V. fig. II-8). Cela revient à prendre comme principale difficulté de l'emboutissage celle rencontrée pour obtenir un rayon d'angle faible. On admet souvent que, pour une seule opération :

$$H \leqslant 5 \text{ à } 7\ R_n$$

Considérons le rayon R du flan circulaire utilisable pour former le quart de cylindre de rayon R_n. Nous pouvons écrire :

$$R = \sqrt{2\,R_n H + R_n^2 - 1{,}14\,R_n\,R_p}$$

R_n étant le rayon d'angle final, H la hauteur des parois verticales de la pièce, R_p le rayon du poinçon. Appelons c un coefficient d'emboutissage défini par la relation $R_n = cR$.

Pour les métaux non ferreux, on prend souvent pour c la valeur 0,25, qui entraîne géométriquement la relation :

$$H \leqslant 7{,}5\ R_n$$

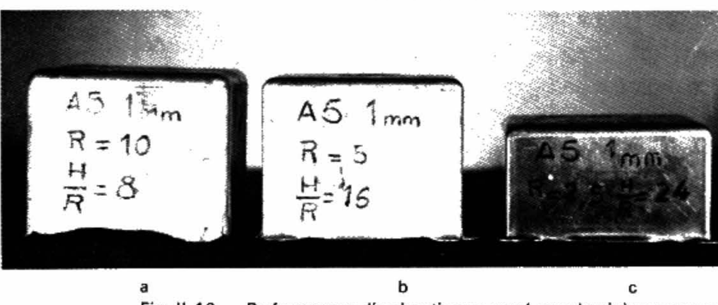


Fig. II-10 — Performances d'emboutissage carré sur aluminium ; rayons d'angle : 10 mm en a, 5 mm en b, 2,5 mm en c (*Aluminium français*)

Pour les métaux ferreux, avec $c = 0{,}30$, il vient :

$$H \leqslant 5\ R_n$$

En réalité, cette règle reliant la hauteur emboutissable au rayon d'angle a été de nombreuses fois dépassée. La figure II-10 montre des emboutis carrés de 100 × 100 mm^2 en aluminium dont la hauteur maximale est constante pour des rayons d'angle R_n variant de 10 à 2,5 mm.

Les expériences les plus complètes sur ce sujet sont dues au professeur Sachs. Les essais ont porté sur des tôles d'acier Martin à l'état demi-dur de diverses épaisseurs ; ils ont fourni les résultats suivants :

— Lorsque l'arrondi d'arête R_n est compris entre 4 et 50 % de la largeur d de la pièce, R_n n'a que peu d'influence sur la hauteur maximale d'emboutissage H (fig. II-11). La

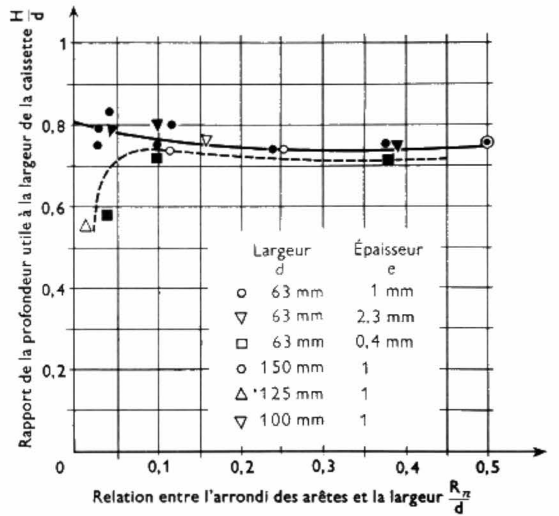


Fig. II-11

hauteur H est alors sensiblement 0,70 à 0,75 d, c'est-à-dire égale à celle d'un embouti cylindrique de diamètre égal à la largeur d de la pièce.

— Si R_n est inférieur à 0,04 d, la hauteur H semble limitée à vingt fois R_n (fig. II-12).

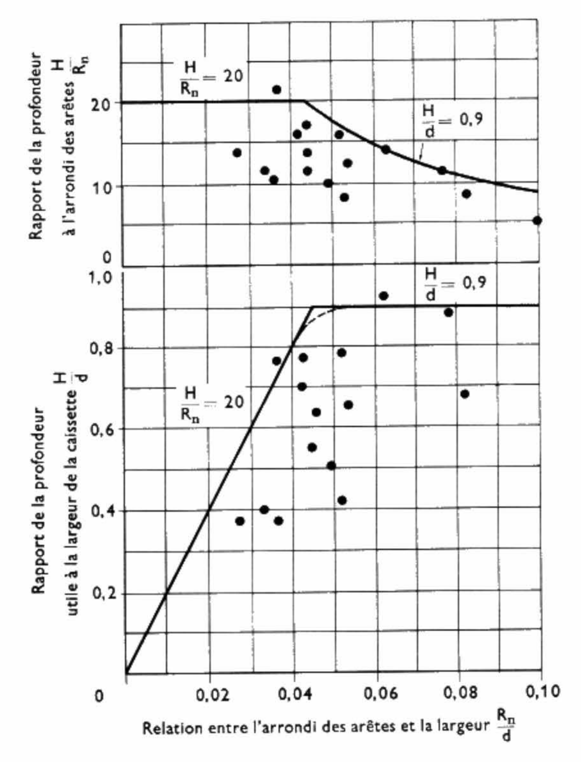


Fig. II-12 — Capacité d'emboutissage rectangulaire pour des rayons d'angle faibles

— Si l'épaisseur du métal e est inférieure à $\frac{250}{d}$, les rayons d'angle faibles sont extrêmement défavorables.

— Le rayon d'angle R_n influe beaucoup sur les possibilités d'emboutissage lorsque la ductilité de la tôle décroît au-dessous d'une certaine valeur.

Sachs ajoute que les formes rectangulaires permettent un rapport $\frac{H}{D}$ plus grand que les formes carrées et, probablement, que les formes triangulaires ou polygonales dont le comportement à l'emboutissage serait analogue à celui des formes carrées. Les expériences montrent que la largeur d équivaut à la racine carrée de la section de ce genre de pièce.

9.1.3. Emboutis en plusieurs passes. — Lorsque l'embouti rectangulaire ne peut pas être obtenu en une seule passe, le problème consiste à tracer le profil des passes successives.

La méthode A.W.F. consiste à calculer successivement les rayons R_1, R_2, ... R_n des poinçons. L'on peut ainsi écrire les équations reliant ces différents rayons :

$$R_1 = c_1R\,;\ R_2 = c_2R_1\,;\ R_3 = c_3R_2\,;\ R_n = c_nR_{n-1}$$

Coefficients *c*

Méthode	c_1 galbée	c_1 droite	c_2
Laitons	0,31	0,37	0,6
Cuivre	0,32	0,38	
Aluminium	0,33	0,40	
Acier doux	0,36	0,43	
Acier inoxydable 18/8	0,40	0,48	
Bronze	0,40	0,48	
Zinc		0,46	

Le tableau précédent donne les valeurs des coefficients c, selon la nature du métal et la méthode adoptée pour le tracé des passes successives (méthode galbée ou méthode droite).

Lorsque les passes successives d'un embouti rectangulaire ont ainsi été calculées, il faut vérifier que le nombre de passes trouvé est compatible avec les possibilités de rétreint du matériel. Pour cela la largeur du flan est divisée par le rapport d'emboutissage $\frac{F}{D}$, et il faut que la largeur de la première passe soit supérieure ou égale à la largeur du flan divisée par $\frac{F}{D}$.

Par exemple, pour l'aluminium $\frac{F}{D} = 1{,}7$ à 1,9, mais pour les emboutis rectangulaires, il faut prendre un rapport d'emboutissage de valeur un peu plus faible : pour la première passe, le rapport 1,6 ; pour la deuxième, le rapport 1,5 ; et pour la troisième, le rapport 1,4.

9.1.4. Tracés des passes. Méthode droite. — La méthode droite consiste à tracer les passes successives d'un embouti rectangulaire en réunissant les rayons calculés précédemment par des lignes droites, suivant l'exemple de la figure II-13. La distance y est de l'ordre de 1,5 R_n et la cote x calculée en conséquence.

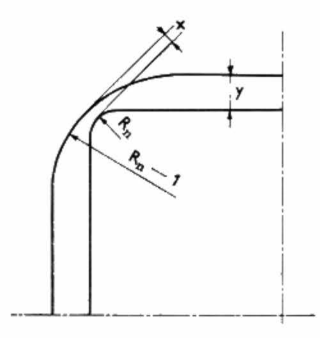


Fig. II-13

Tracé des passes ; méthode droite

Méthode galbée. — La méthode galbée est préférable à la méthode droite car elle permet, en général, l'exécution de la pièce avec une passe de moins. Toutefois, l'ajustage de la matrice en est plus onéreux, du fait du contour.

La règle générale pour le tracé des passes successives consiste à laisser le minimum d'écart dans les angles, juste le passage du serre-flan tubulaire. À partir de la dernière passe, il faut passer du carré ou du rectangle au rectangle curviligne et, si possible, au cercle si le nombre de passes le permet. Le but est de donner le même écrouissage sur tout le pourtour du flan.

Wassilieff propose un tracé géométrique des passes de la méthode galbée, indiqué figure II-14. Le centre O_{n-1} est

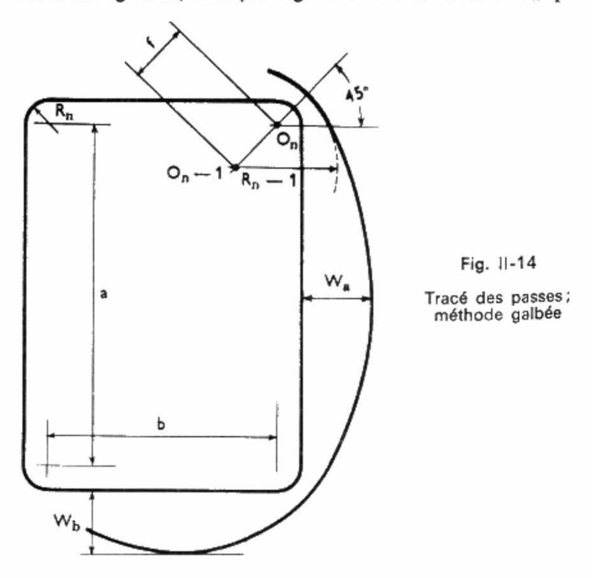


Fig. II-14

Tracé des passes ; méthode galbée

sur une droite à 45° et distant du centre O_n de la distance :

$$f = O_nO_{n-1} = \frac{1}{2}(R_{n-1} - R_p)$$

R_{n-1} étant calculé par la formule $R_n = c_nR_{n-1}$, avec R_p pour rayon de poinçon. Puis ces rayons sont réunis par des courbes distantes du tracé de la dernière passe des quantités :

$$W_a = \frac{12\,a}{100} \quad \text{et} \quad W_b = \frac{12\,b}{100}$$

Exemples. — La figure II-15 illustre le tracé des passes d'un embouti carré de 45 mm × 45 mm, hauteur 50 mm, en aluminium de 0,5 mm. La première passe est une circonférence, la deuxième un carré curviligne et la quatrième le carré définitif.

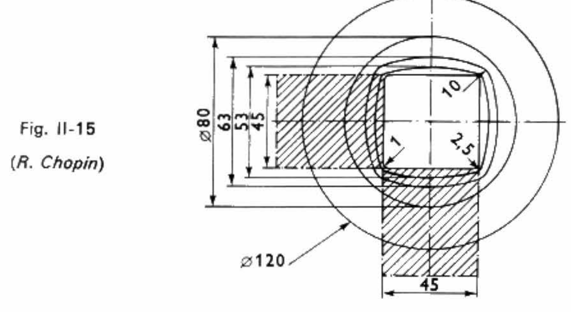


Fig. II-15
(*R. Chopin*)

La figure II-16 illustre le tracé des passes d'un embouti de 70 mm × 45 mm, hauteur 50 mm, en aluminium de 0,5 mm, réalisé au moyen d'emboutis curvilignes.

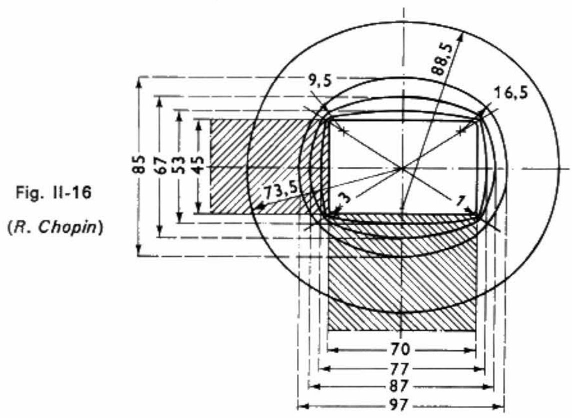


Fig. II-16
(*R. Chopin*)

On peut constater facilement, à l'examen de ces tracés, que, dans les angles, le fait de réduire l'écart entre deux passes au minimum compatible avec l'exécution de l'outillage, avec excentrement des centres des circonférences, permet d'éviter l'accumulation du métal dans les angles, et en assure une meilleure répartition (fig. II-17).

Les outillages ayant permis l'exécution de ces pièces sont du type classique à serre-flan plan en première passe et à serre-flan tubulaire ou mamelon pour les autres opérations. Il peut être utile de prévoir une passe très faible en finale, laminant légèrement le métal pour effacer les marques de reprise.

Chacun des poinçons est chanfreiné à 45° en partant du tracé de la passe suivante (fig. II-18) et chacune des matrices est également chanfreinée à 45° en partant de son propre tracé, sur une largeur légèrement supérieure à l'écart entre elle et la passe précédente.



Fig. II-17

Trois passes sans serre-flan, d'un boîtier en acier doux de 1 mm
(*R. Chopin*)

Le cliché montre le peu d'écart entre les angles

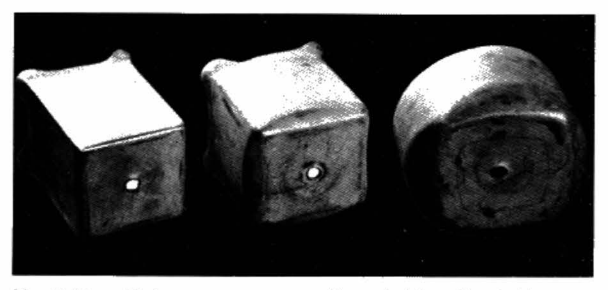


Fig. II-18 — Trois passes avec serre-flan tubulaire, d'un boîtier en aluminium (*R. Chopin*)

Lorsqu'il s'agit d'emboutis particulièrement profonds ou de tôles d'acier on a intérêt à procéder par emboutissage sans serre-flan tubulaire.

Les figures II-19 et II-20 montrent le tracé des passes d'un embouti rectangulaire en tôle d'acier de 0,5 mm, de 56 mm × 11 mm et de 76 mm de profondeur, et le tracé d'un embouti en aluminium de 0,5 mm, de 42 mm × 25 mm, de hauteur 120 mm.

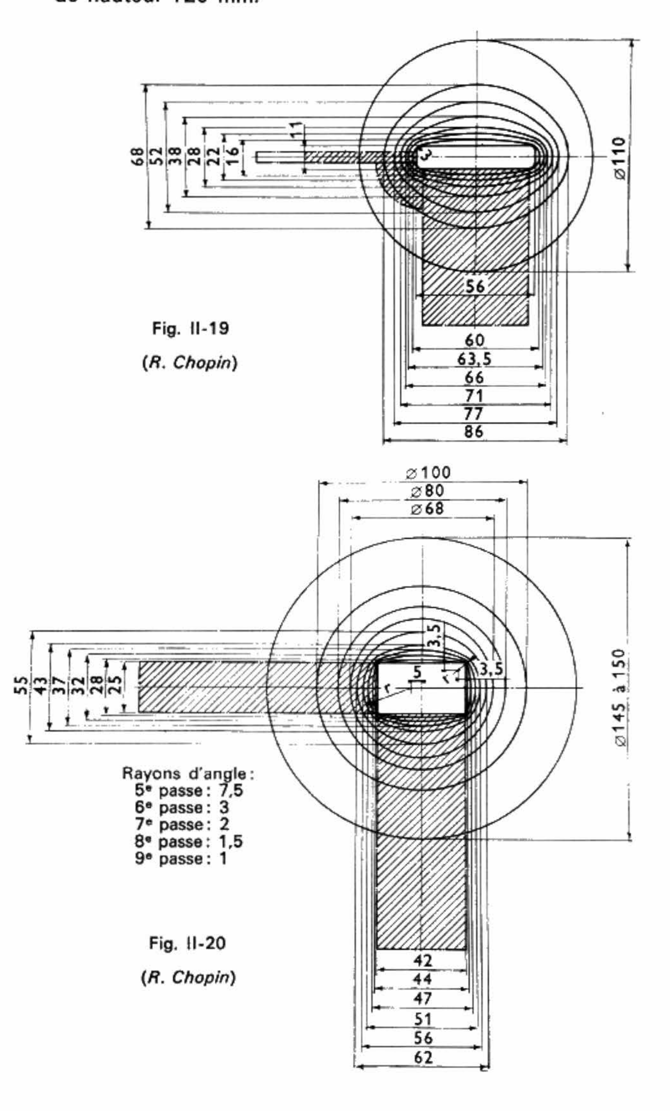


Fig. II-19
(*R. Chopin*)

Fig. II-20
(*R. Chopin*)

L'impossibilité de déterminer par avance la répartition exacte de la matière provoque généralement des irrégularités à la partie supérieure des emboutis. On a intérêt à les supprimer par un détourage si l'on veut éviter des arrachements dans les angles aux passes suivantes.

L'usure des matrices étant beaucoup plus grande à cet endroit, il est recommandé de laisser subsister ces cornes lors de la détermination du flan si l'on veut éviter des creux pouvant provoquer le rebut des pièces, par manque de hauteur ou repli du métal.

Les rayons d'arête des poinçons et matrices à observer sont ceux précédemment indiqués pour les pièces cylindriques. La mise au point détermine le jeu à observer dans les angles; il est toujours plus grand que dans les parties droites, sans exagération toutefois afin d'éviter les fissures verticales dans les angles.

Avec les pièces en acier, une précaution indispensable doit être prise: il faut procéder à un léger recuit au chalumeau des angles ou de la totalité de la pièce au four.

9.2. Emboutis coniques

9.2.1. Pièces légèrement coniques. — Notons, tout d'abord, que dans le dessin d'une pièce, même lorsque le dessinateur prévoit une légère dépouille pour faciliter l'extraction, le travail d'emboutissage est toujours compliqué. En effet, une pièce de forme quelconque, à parois verticales, est toujours beaucoup plus aisée à obtenir que cette même pièce avec une dépouille de 1 ou 2°. Ce phénomène, bien connu, est d'ailleurs encore plus sensible avec les alliages de cuivre et d'aluminium, qui sont des matériaux très faciles à emboutir, à condition qu'ils soient bien guidés entre poinçon et matrice. Chaque fois que cela est possible, on cherche à supprimer ces dépouilles prévues par un dessinateur trop consciencieux.

Dans la suite, nous ne parlerons pas de ces pièces légèrement coniques qui se traitent, avec plus ou moins de réussite d'ailleurs, de la même façon que des emboutis parfaitement rectangulaires, mais seulement des pièces pour lesquelles le cône est très accentué.

9.2.2. Emboutis hémisphériques. — L'emboutissage des demi-sphères donne souvent naissance à des plis longitudinaux. Le serrage du serre-flan est insuffisant pour en éviter la formation et il risque d'entraîner la rupture du fond de la calotte. Plusieurs méthodes permettent d'aboutir à un résultat et il convient de procéder à l'exécution de l'outillage de la façon suivante:

1° *Méthode a.* — Exécuter un outil d'emboutissage à serre-flan, dans lequel la matrice est simplement une matrice pour emboutissage cylindrique ordinaire. Le poinçon a la forme et les dimensions de la demi-sphère à emboutir et l'extracteur, celle d'une petite calotte sphérique concave pour éviter les déformations à l'extraction (fig. II-21 a). Cette méthode convient généralement pour l'aluminium et les laitons.

Fig. II-21

Emboutissage d'une demi-sphère

Extracteur

Extracteur de 1re opération

Méthode a

Méthode b

Méthode c

Si cet outillage ne peut donner satisfaction — alternative entre les plis ou la crevaison — on détermine par tâtonnement une profondeur d'emboutissage aussi voisine que possible de la profondeur finale, laissant former les plis nécessaires pour éviter la crevaison. L'ébauche est ensuite recuite et réemboutie dans le même outil, sur serre-flan serré au maximum pour limiter le glissement et résorber les plis de l'ébauche.

2° *Méthode b.* — Si la méthode précédente ne permet pas d'obtenir satisfaction, il est possible de conserver la matrice et le serre-flan et de faire un poinçon d'ébauche cylindrique au diamètre de la demi-sphère avec un très fort rayon au sommet (fig. II-21 b).

On détermine par tâtonnement la hauteur de l'embouti-ébauche qui, après un recuit, est embouti dans la même matrice sur le poinçon en forme et dans les conditions indiquées au dernier alinéa de la méthode a.

3° *Méthode c.* — Une meilleure méthode, dont l'outillage est d'un prix plus élevé, consiste à exécuter un poinçon d'ébauche suivant le tracé donné figure II-21 c. L'ébauche est ensuite réemboutie sur poinçon définitif par retournement du métal, ce qui permet fréquemment d'éviter le recuit de l'ébauche.

Ce procédé permet d'éviter l'effort de perforation du sommet de la sphère (il est reporté sur une large couronne) et partant d'augmenter le serrage du serre-flan et d'empêcher la formation des *bananes*. L'extracteur permet d'obtenir par allongement le métal qui, retourné, formera le sommet de la sphère.

Remarque. — Les deux dernières méthodes sont surtout applicables aux aciers.

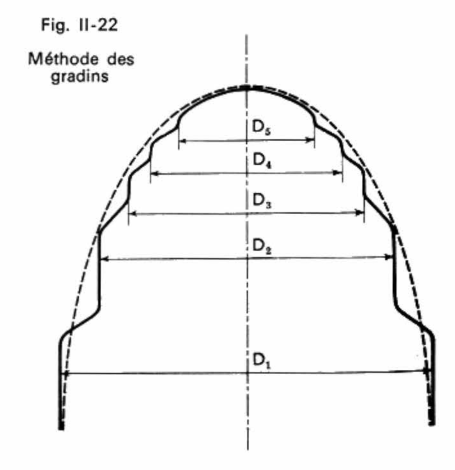
De toute façon, il est évident que l'embouti hémisphérique ne peut être réalisé en une opération que si le diamètre du flan n'est pas trop grand, c'est-à-dire à condition que le rapport d'emboutissage possible soit respecté $\left(\frac{F}{D} = 1{,}8 \text{ environ}\right)$.

Sinon, il faut réaliser la pièce en plusieurs passes en « amenant » à chaque opération une quantité de matière légèrement inférieure à celle nécessaire.

9.2.3. Méthode des gradins. — La méthode la plus classique, pour réaliser un cône, peut être appliquée aux pièces de révolution ou autres. Cette méthode, dite « à gradins », est schématisée sur la figure II-22. Elle consiste en une série de rétreints, qui permettent d'obtenir un embouti en gradins qui s'inscrit dans la courbe-enveloppe de la pièce à réaliser. Cette méthode présente un certain nombre d'inconvénients. Tout d'abord le nombre de passes est assez élevé, notamment pour l'obtention de pièces très pointues (vers la pointe du cône les rétreints possibles sont faibles). Ensuite, à chacune de ces opérations correspond un outillage complet d'emboutissage avec poinçon, matrice à 45° et serre-flan tubulaire; l'emploi de ces outillages impose, évidemment, l'utilisation d'une presse d'une importante hauteur utile sous le coulisseau porte-poinçon. Enfin, toutes les reprises marquent les pièces

Fig. II-22

Méthode des gradins



d'une striction qui ne peut être effacée que par un polissage long et coûteux, sauf pour des pièces exécutées par ce procédé en très grande série — notamment sur machine transfert — pour lesquelles la gamme prévue est extrêmement large; la frappe sous le balancier ne suffit généralement pas à rétablir une épaisseur uniforme; il faut envisager un lissage au tour à repousser, opération de reprise longue, donc coûteuse.

Cette méthode des gradins est recommandable lorsque l'angle au sommet du cône se trouve compris entre 35 et 50°. Il suffit de remplacer les chanfreins des serre-flan tubulaires, matrices et poinçons, habituellement à 45°, par l'angle convenable. Les gradins sont ainsi évités.

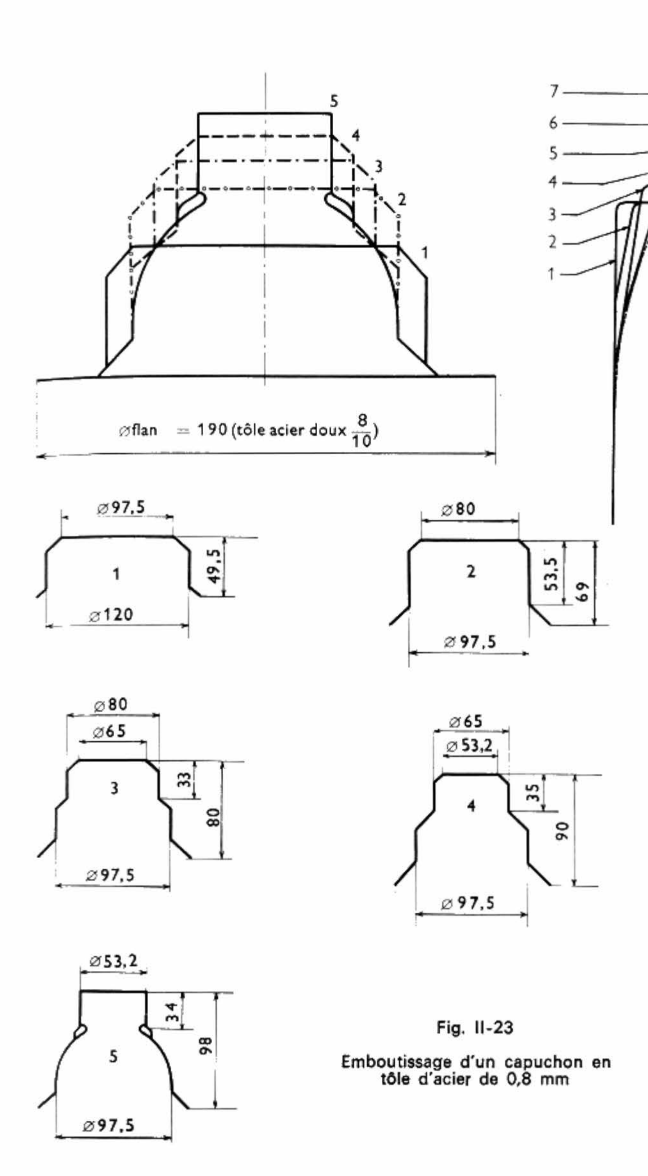


Fig. II-23

Emboutissage d'un capuchon en tôle d'acier de 0,8 mm

Fig. II-24

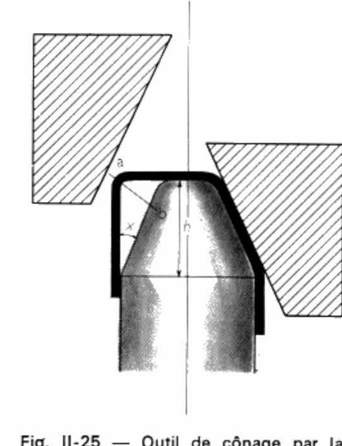


Fig. II-25 — Outil de cônage par la méthode des cônes tangents

Exemple. — Capuchon en tôle d'acier de 0,8 mm (fig. II-23).

Le flan d'un diamètre de 190 mm est embouti au diamètre de 120 mm.

Après un recuit, il est rétreint successivement à 97,5, 80, 65 et 53,2 mm, diamètre du téton final en respectant l'inscription de l'ébauche dans la forme définitive.

Remarquons que la cinquième opération ne respecte pas cette règle pour ménager la quantité de matière qui est nécessaire pour former, sans allongement excessif, le bourrelet placé à la base du téton.

Le renformage prévoit en relief ce bourrelet qui sera repoussé à la molette au cours d'une opération de reprise sur moulureuse.

9.2.4. Méthode des cônes tangents. — Cette méthode ne s'applique guère qu'aux emboutis en cuivre laiton ou aluminium (et ses alliages).

Elle consiste à rétreindre le métal par compression dans le vide sur un poinçon de forme. Il est toutefois nécessaire de posséder une expérience suffisante pour « apprécier » les limites dans lesquelles le métal supporte de se rétreindre sans flamber.

L'exemple d'une gamme d'opérations employant cette méthode est indiqué figure II-24. Le nombre d'opérations nécessaire est sensiblement le même que dans la méthode à gradins, mais pour chacune des passes, il n'y a plus qu'un poinçon et une matrice coniques sans serre-flan ; l'outillage est donc moins onéreux. La méthode consiste essentiellement à côner, sur une certaine hauteur et suivant un certain angle, une partie de l'ébauche cylindrique ayant le diamètre de base de la pièce définitive. L'outillage est représenté figure II-25. Chaque opération est possible, à condition que la distance *ab* soit relativement modeste, et c'est la raison pour laquelle l'angle de cônage *x* et la hauteur *h* doivent être limités. Sur la figure II-24, par exemple, entre l'opération 1 et l'opération 2, on n'approche pas encore le cône tangent à la pièce définitive ; de l'opération 2 à l'opération 3, on a côné suivant le même angle que la passe précédente, mais sur une plus grande hauteur, ce qui permet de « tangenter » déjà le profil définitif ; puis de l'opération 3 à l'opération 4, on a augmenté, mais sur une certaine hauteur seulement, l'angle de cônage, etc. Quand on a obtenu ainsi une ébauche constituée par des cônes tangents au profil définitif à obtenir, la dernière opération est faite sur balancier.

Contrairement à la méthode des gradins, ce procédé par cônes tangents, qui fait travailler le métal à la compression, ne donne pas de marque de striction.

9.2.5. Cônages successifs en matrice définitive. — Le procédé par cônes tangents peut encore être amélioré en utilisant le cônage dans une seule matrice. L'ogive de la figure II-26 a été réalisée entièrement par cette méthode, sans aucune striction. Ce procédé est un peu le même que celui par cônes tangents, mais il permet d'obtenir la pièce directement à la forme définitive, dans la matrice définitive,

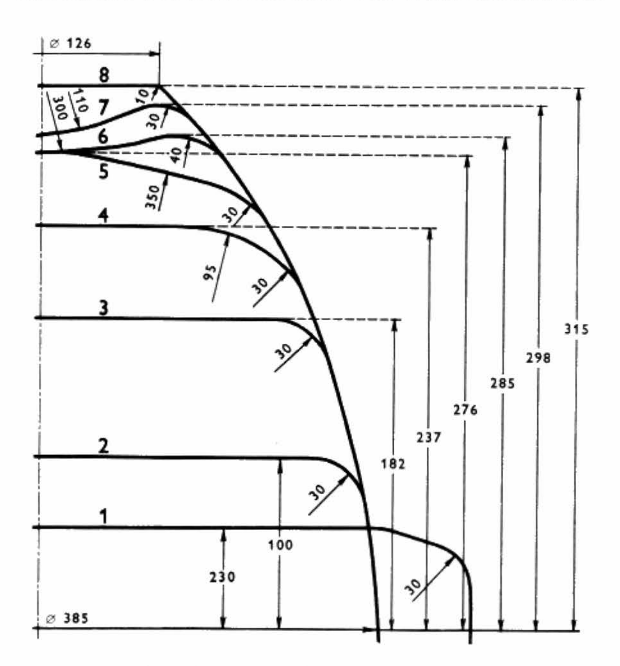


Fig. II-26 — Gamme de cônages en matrice définitive (*Aluminium français*)

avec des poinçons successifs dont la hauteur augmente à chaque opération. La hauteur des poinçons intermédiaires est approximativement fixée par l'expérience et de façon définitive lors de la mise au point.

Ce procédé, qui évidemment ne donne pas de marque de striction, permet d'utiliser un outillage assez réduit, puisque notamment, il ne comporte qu'une seule matrice, pièce à paroi curviligne et de grande profondeur difficile à usiner et surtout à ajuster avec le poinçon. L'exécution d'un outil simple, employant cette méthode de cônage, est aisée. On commence par exécuter, en acier ou en fonte, suivant gabarit, le poinçon de la forme définitive, travail relativement simple. Puis on se sert de ce poinçon comme noyau pour couler une matrice en kayem; si la coulée est parfaitement réalisée un grattage intérieur suffit, indépendamment, évidemment, du dressage des bases. Un frettage de la matrice est à recommander pour éviter l'éclatement de cette pièce soumise à d'énormes efforts d'extension. Les poinçons intermédiaires, dont la hauteur et les rayons sont fixés au cours de la mise au point, sont coulés directement dans la matrice et ne nécessitent généralement qu'un grattage, avec le dressage de la base de fixation. Leur hauteur, définie préalablement par l'expérience, est ramenée progressivement à la valeur convenable par simple dressage de la face.

Cette méthode a permis l'exécution aisée de pièces de révolution en tôle mince, mais aussi de pièces ne présentant qu'un seul plan de symétrie. Par cette méthode ont été réalisés, par exemple, des butoirs de pare-choc d'automobiles (fig. II-27) en A-G3 de 2,5 mm d'épaisseur, particulièrement difficiles à réaliser monobloc par emboutissage.

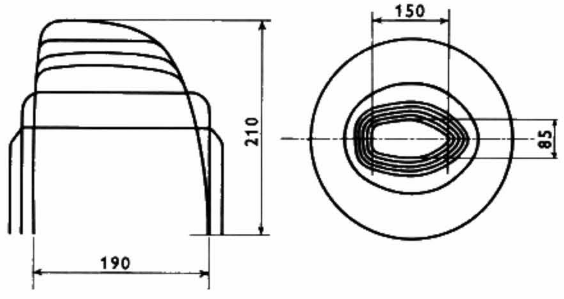


Fig. II-27 — Passes pour un butoir de pare-choc (*Aluminium français*)

9.2.6. Emboutissage conique par retournement. — Il existe encore un autre procédé qui donne d'excellents résultats avec les non ferreux, et permet de dépasser les limites usuelles de déformation. C'est le procédé de l'emboutissage conique par retournement. La figure II-28 représente un type d'outil utilisé dans lequel la bague n'a

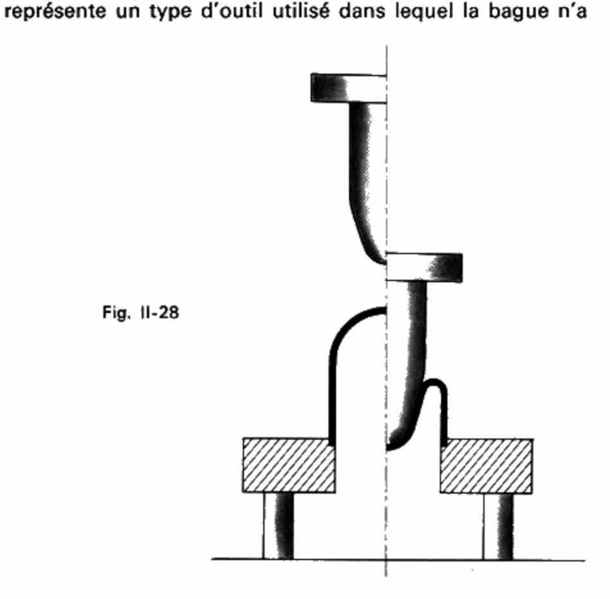


Fig. II-28

pour rôle que de centrer et de maintenir en place l'extrémité ouverte de l'embouti précédent.

En quelque sorte, le métal se retourne dans le vide sur son rayon d'enroulement naturel; ce processus de retournement dans le vide ne permet que des réductions diamétrales de l'ordre de 10 %.

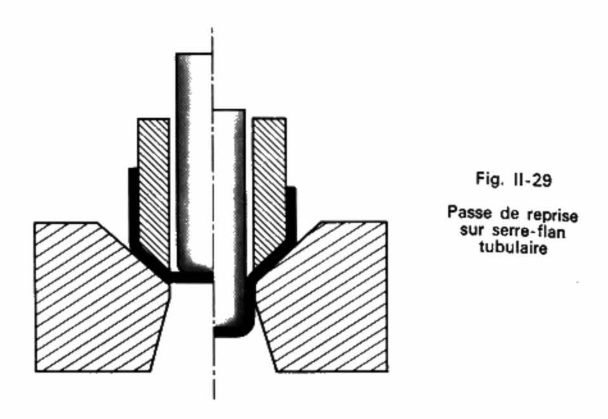


Fig. II-29

Passe de reprise sur serre-flan tubulaire

Dans l'*outil de reprise suivant la méthode de serre-flan tubulaire* celui-ci agit en deuxième opération (fig. II-29) sur une partie annulaire chanfreinée. Le poinçon de première passe doit donc avoir le profil indiqué figure II-30, D_2 étant le diamètre prévu pour la deuxième passe, et

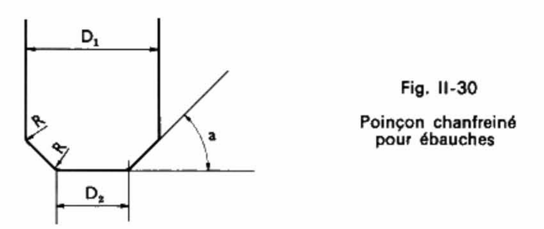


Fig. II-30

Poinçon chanfreiné pour ébauches

l'angle *a* étant de 45° généralement ou de 38°, notamment pour les tôles minces et les grands diamètres. Les rayons de raccordement *R* entre chanfrein et diamètres sont variables avec l'épaisseur de la tôle:

e	0.5	1	2	3	4	5 mm
R	4.5	5	5,5	6.5	8	10 mm

Ces rayons de raccordement ont effectivement intérêt à être augmentés au maximum de façon à éviter les marques de reprise et à diminuer le plus possible la pression de serre-flan nécessaire; toutefois, ils ne doivent pas être importants pour ne pas trop diminuer la portée réelle de l'effort serre-flan. Les outils de reprises ultérieures sont évidemment construits suivant le même principe.

La figure II-31 illustre un type d'*outil d'étirage d'embouti par retournement de l'ébauche* dont le coefficient de réduction peut atteindre 30 %.

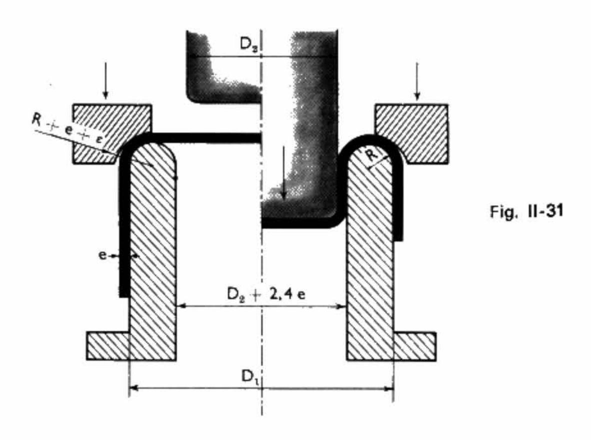


Fig. II-31

9.3. Formage par déformation mécanique du caoutchouc

9.3.1. Procédé Guérin. — Un bloc de caoutchouc emprisonné dans un conteneur fixé au coulisseau d'une presse hydraulique est appliqué sur une forme portée par la table de la presse (fig. II-32).

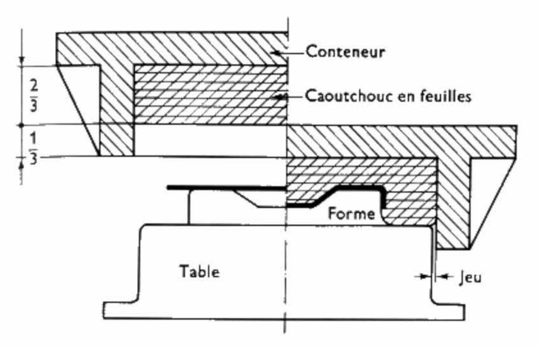


Fig. II-32 — Principe du travail en caoutchouc

L'élasticité du caoutchouc lui permet d'occuper les espaces entre les formes les plus diverses; du fait de son incompressibilité il s'insère dans ces espaces quand la presse est mise en action; le métal à former, orienté sur l'empreinte à obtenir, reçoit la poussée du coulisseau de la presse. Le procédé nécessite l'emploi de presses hydrauliques de grande puissance; la surface du matelas en caoutchouc logé dans le caisson dépend de la force de la presse; cette surface est basée sur une pression de travail minimale de 100 daN/cm². Pour ce genre de formage, on utilise des caoutchoucs dont la dureté Shore est inversement proportionnelle à la profondeur à obtenir.

Profondeur de formage en millimètres	25	50	75	100	150
Valeurs indiquées au duromètre Shore	80	71	66	62	55

9.3.2. Procédé Marform (fig. II-33). — Ce procédé est une modification du procédé Guérin, il permet la réalisation d'emboutissages profonds, en utilisant le même caisson et le même matelas en caoutchouc montés par les mêmes moyens.

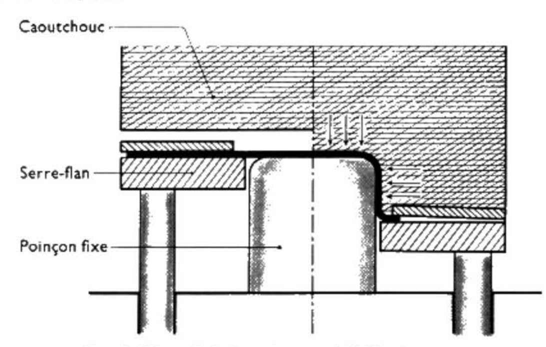


Fig. II-33 — Principe du procédé Marform

Le principe différent consiste en l'utilisation d'un serre-flan en combinaison avec le matelas en caoutchouc; ce serre-flan de type conventionnel entoure le poinçon et repose sur les chandelles de pression qui sont actionnées par la tête du piston hydraulique monté sous la table de presse.

C'est en contrôlant le volume d'huile de la chambre inférieure du cylindre que l'on peut faire varier la pression exercée sur le flan pendant la course de travail.

L'utilisation du procédé Marform permet de plaquer le métal à emboutir sur le sommet du poinçon, qu'il soit plan, convexe, concave ou oblique ce qui limite les strictions possibles. Un autre avantage du procédé est qu'une seule face du flan est en contact avec la surface métallique du serre-flan; l'écrouissage du métal ne se produit pas aussi rapidement que lorsqu'il est étiré entre deux surfaces dures et le caoutchouc transmet sa pression interne dans toutes les directions, ce qui limite la tension habituelle appliquée au métal dans la zone du rayon du poinçon. La pression fonctionnelle appliquée normalement est de 400 daN/cm². Le procédé offre des possibilités de pourcentage de réduction exceptionnelle; *une réduction de 55 à 60 % du diamètre du flan est considérée normale* et, dans certains cas, on a pu obtenir jusqu'à 70 %.

9.4. L'emboutissage par déformation hydraulique de caoutchouc. Procédé Hydroform.

— Le procédé d'emboutissage appliqué par cette machine permet des résultats d'emboutissage spectaculaires; le principe est le suivant: un poinçon solide pénètre dans une matrice souple qui est maintenue contre lui par une pression hydraulique appliquée dans toutes les directions.

Le coulisseau supérieur de la presse porte une chambre de pression contenant le fluide; elle est fermée à sa partie inférieure par plusieurs épaisseurs d'un matériau plastique: diaphragme en caoutchouc protégé par un coussin en caoutchouc.

Le serre-flan fixe est disposé sur la table de la presse et le flan positionné sur le serre-flan. Le conteneur-matrice s'abaisse jusqu'à ce que la membrane entre en contact avec le flan, puis est bloqué dans cette position. La pression fixée s'établit dans le conteneur, agissant directement sur le flan. Le poinçon mû d'un mouvement ascensionnel, s'introduit partiellement dans le conteneur-matrice en déformant les membranes d'obturation en même temps que le flan. Un dispositif à cames permet de commander les variations de la pression, qui peut atteindre 10 kN/cm².

La figure II-34 schématise les différentes phases du cycle.

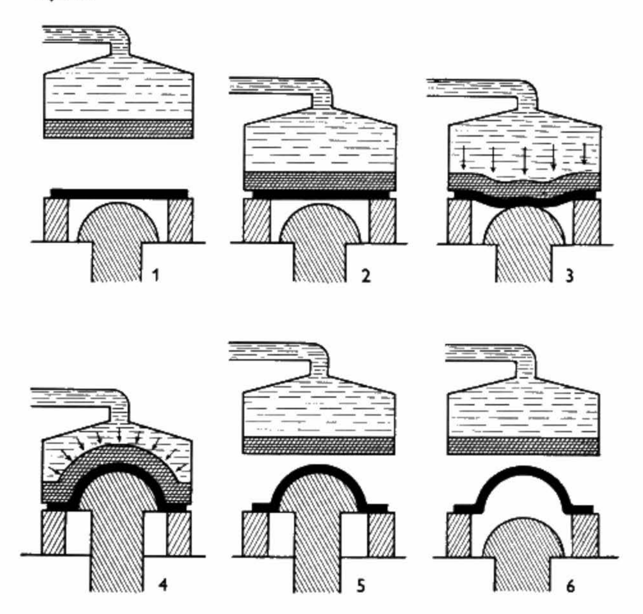


Fig. II-34 — Principe du procédé Hydroform

De même qu'avec le procédé Marform, les réductions de diamètre du flan peuvent atteindre jusqu'à 70 % suivant la nature des métaux travaillés. La souplesse de la membrane facilite l'obtention de pièces asymétriques ou présentant des saillies qui ne supporteraient pas l'emboutissage mécanique et ce, avec d'infimes variations d'épaisseur.

Le changement de la membrane de contact s'opère après fabrication de 2 000 à 4 000 pièces, et celui de la membrane supérieure toutes les 8 000 à 10 000 pièces suivant le travail effectué.

La cadence de production horaire de la presse Hydroform comme d'ailleurs celle de la presse Marform est relative-

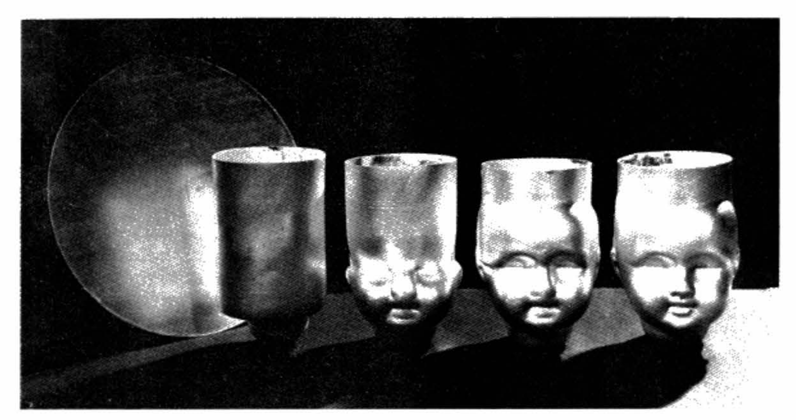


Fig. II-35 — Gonflage au caoutchouc (*Aluminium français*)

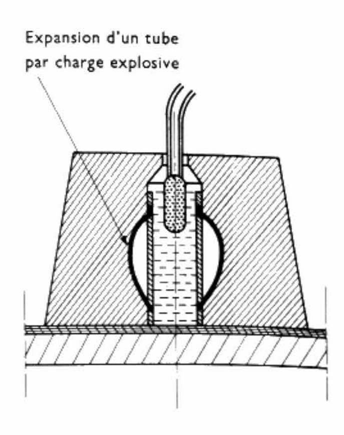
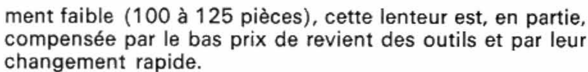
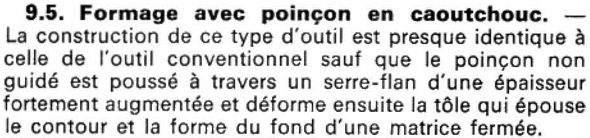


Fig. II-37 (*G.C.*)



ment faible (100 à 125 pièces), cette lenteur est, en partie, compensée par le bas prix de revient des outils et par leur changement rapide.



9.5. Formage avec poinçon en caoutchouc. — La construction de ce type d'outil est presque identique à celle de l'outil conventionnel sauf que le poinçon non guidé est poussé à travers un serre-flan d'une épaisseur fortement augmentée et déforme ensuite la tôle qui épouse le contour et la forme du fond d'une matrice fermée.

La plasticité du caoutchouc évite le risque de crevaisons dues aux efforts localisés surtout dans le cas de reliefs importants au fond d'une matrice.

En revanche, on doit toujours opérer sur une presse à vitesse lente, de préférence à commande hydraulique, assurant une pression minimale de 100 daN/cm^2.

Dans de nombreux cas, on emploie des matrices ouvrantes en deux coquilles afin de permettre l'extraction de la pièce produite.

C'est le cas de la tête de poupée (fig. II-35), obtenue par introduction et compression d'un cylindre en caoutchouc dans un embouti recuit réalisé par les procédés conventionnels.

La figure II-36 montre un outil d'emboutissage en métal poli protégé par une couche d'usure en Éladip. L'Éladip est un élastomère de polyuréthanne couramment utilisé pour les métaux polis.

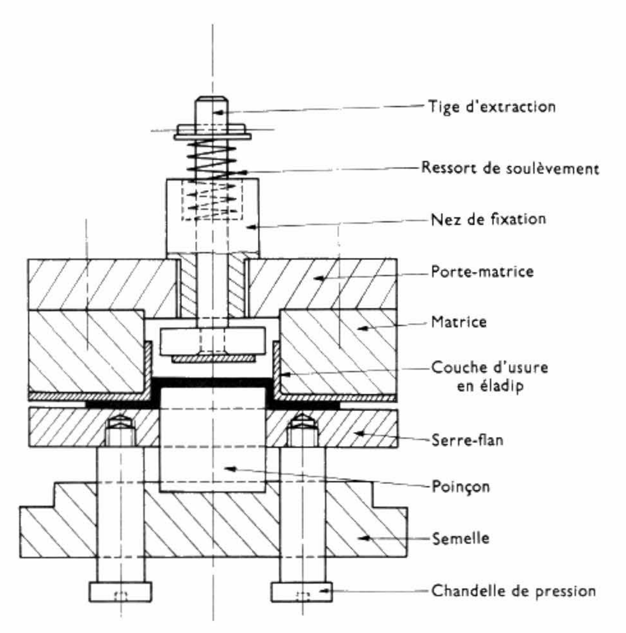


Fig. II-36 — Outil d'emboutissage d'un flan poli (*G.C.*)

9.6. Formage par explosif. — On utilise surtout les explosifs haute pression dont le régime de décomposition est la détonation ; ce sont les explosifs brisants. Les vitesses de détonation sont extrêmement élevées (entre 6 000 et

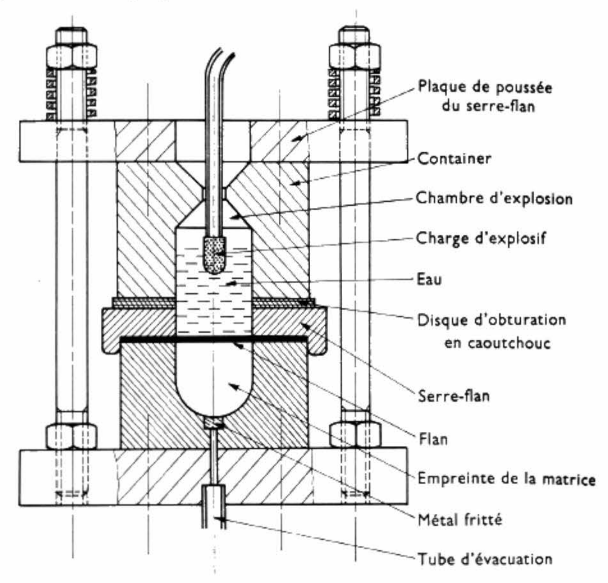


Fig. II-38 (*G.C.*)

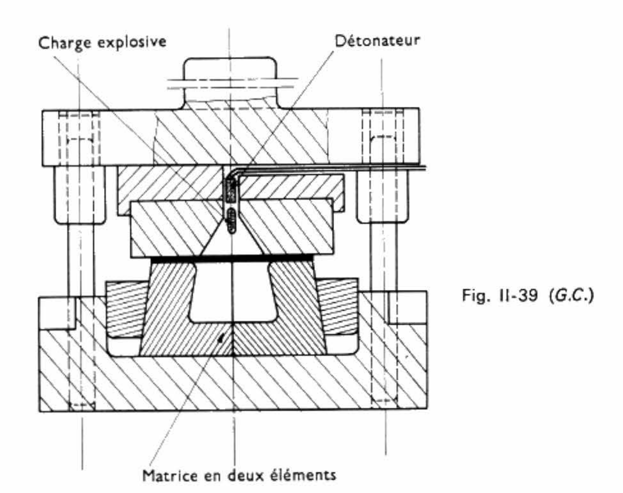


Fig. II-39 (*G.C.*)

8 000 m/s) et les pressions peuvent atteindre 20 kN/mm^2 ; c'est l'onde de choc qui réalise le formage.

On utilise cette technique pour la fabrication de fonds de réservoirs et également de prototypes de grand encombrement destinés à l'industrie aéronautique. Son exploitation implique un personnel spécialisé et les aires de travail doivent être éloignées de toute habitation ; les figures II-37, II-38, II-39 montrent trois types d'outils affectés à cette technique.

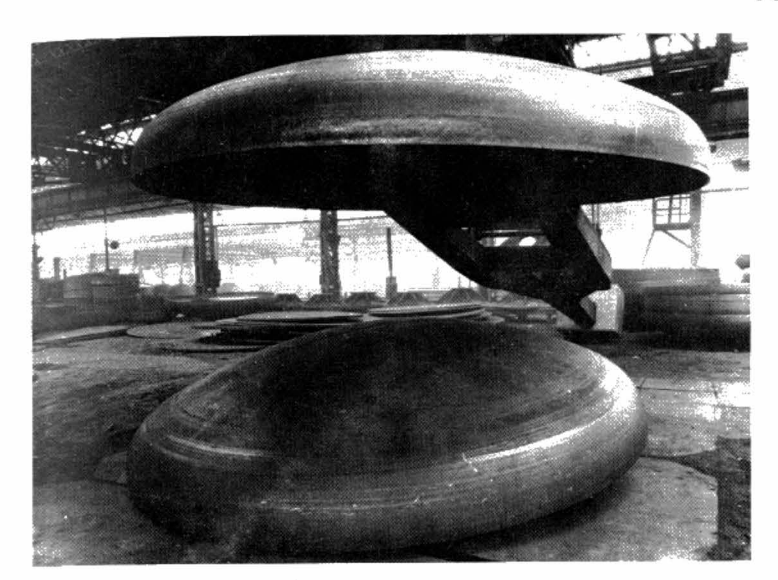


Fig. II-40

Fonds en anse de panier à grand rayon de carre, dont l'un est placé sur une fourche de manutention (*Desmarez-Vallourec*)

10. EMBOUTISSAGE À CHAUD

10.1. Généralités. — L'emboutissage à chaud diffère de l'emboutissage à froid par le fait que la tôle, et parfois aussi les outillages, sont portés à haute température.

On peut être amené à choisir une opération à chaud par suite des considérations suivantes :

a) l'élévation de température diminue la résistance du métal à la déformation et annule son élasticité ; on peut donc effectuer un travail déterminé avec des presses moins puissantes et des outillages beaucoup plus simples, généralement en fonte ;

b) l'élévation de température peut entraîner des transformations favorables à la déformation (et permettre des réductions plus fortes) telles, par exemple, la transformation austénitique dans les aciers, l'apparition de nouveaux plans de glissement dans le magnésium à partir de 150 °C, l'amélioration de l'indice d'écrouissage dans les alliages d'aluminium vers 200 °C. Certains métaux ne peuvent s'emboutir qu'à chaud ; la température à atteindre est variable selon les aciers ; elle peut se trouver voisine de celle du forgeage ;

c) on peut opérer au-dessus de la température de recristallisation et éviter ainsi l'écrouissage et ses conséquences ;

d) l'emboutissage à chaud est bien moins sensible que l'emboutissage à froid à la qualité du métal ; en particulier, tout acier de qualité loyale et marchande doit pouvoir subir une opération moyenne d'emboutissage à chaud. Toutefois, certains éléments ajoutés à l'acier au carbone ordinaire, pour améliorer sa tenue, peuvent créer des zones de températures critiques amenant des criques. En revanche, et pour n'importe quelle nuance d'acier considérée, d'autres zones favoriseront le rétreint, tout en laissant au métal une tenue suffisante dans l'effort d'emboutissage.

Cependant, l'emboutissage à chaud nécessite des installations thermiques coûteuses qui consomment une quantité appréciable de combustibles ; il représente (en particulier pour l'acier) un travail pénible, et requiert généralement des frais de calibrage importants, car les pièces de tôle, sortant des matrices encore chaudes, se déforment d'elles-mêmes. Ce dernier travail, qui se fait à la main ou à la dresseuse hydraulique, est naturellement peu rapide, et nécessite une main-d'œuvre exercée. De plus, il laisse les surfaces recouvertes de calamine, ce qui peut conduire à la nécessité de sabler ou de décaper.

En résumé, l'emboutissage à chaud se recommande :

a) quand la nature du métal ne permet pas de déformation à froid ;

b) quand l'épaisseur de la tôle dépasse la capacité des presses à froid ;

c) quand, en raison de la faible série des pièces à exécuter, on désire éviter les frais d'outillages importants que nécessite l'emboutissage à froid.

Cependant les frais de main-d'œuvre sont considérables et la productivité du procédé est faible.

Parmi les applications les plus courantes de l'emboutissage à chaud, citons les fabrications suivantes :

— les fonds de réservoir haute, moyenne ou basse pression, bouchons de trous d'homme, brides, etc. (fig. II-40) ;

— les pièces de structure pour matériel de chemins de fer (châssis, bogies, etc.), camions, remorques, etc. (fig. II-41) ;

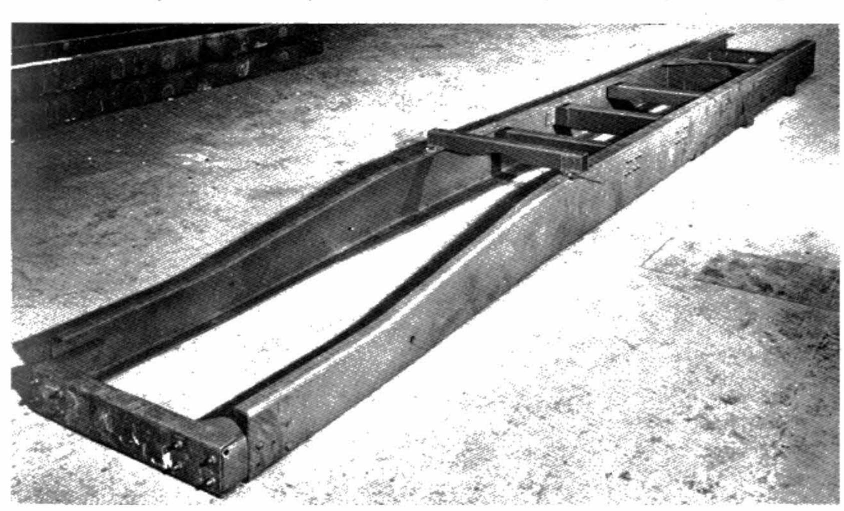


Fig. II-41

Cadre de châssis assemblé (*Studio de Septenville-Vallourec*)



Fig. II-42

Cuve en éléments emboutis et soudés (*Arbel*)

— les éléments de blindages, gabariages de tôles, etc. (fig. II-42).

Le métal le plus couramment travaillé est l'acier doux; viennent ensuite les aciers alliés, les aciers inoxydables et réfractaires, les aciers plaqués, l'aluminium et ses alliages, les alliages ultra-légers.

10.2. Fours. — Les types de fours dépendent du métal travaillé et des séries envisagées. Pour l'acier, qui doit être chauffé entre 700 et 1 200 °C, on choisit soit un four *dormant*, soit un four *à sole mobile*, soit un four *à longerons mobiles*.

Pour les alliages légers, on emploie de préférence un four *à bain de sel*.

Il faut que la température des tôles soit homogène sur toute leur surface, pour obtenir une déformation uniforme. Toutefois, un contrôle précis de la température n'est utile que dans des cas particuliers.

10.3. Outillages. — Les outillages pour emboutissage à chaud sont faits en fonte, matériel suffisant pour résister aux faibles pressions unitaires mises en jeu. Au cas où des contraintes de tension apparaissent, on utilise des frettes en acier.

Ces outillages sont fréquemment constitués par segments, fixés individuellement sur la table rainurée de la presse (fig. II-43).

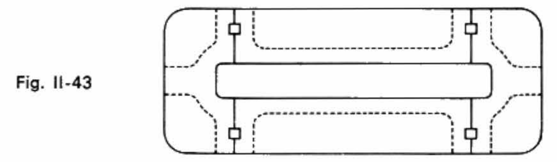


Fig. II-43

Pour les pièces de révolution on emploie des mandrins à segments extensibles (fig. II-44) permettant un réglage du diamètre du poinçon en fonction de l'épaisseur de la tôle, et facilitant l'enlèvement de la pièce après emboutissage.

Pour tenir compte de la dilatation, variable suivant la nature du métal à transformer, ces outillages sont dimensionnés pour un retrait de 7 à 14 ‰.

Dans le cas de l'emboutissage du magnésium, on chauffe les outils à la même température que la tôle (300 à 350 °C).

10.4. Préparation des flans. — Il est pratiquement *impossible*, dans l'emboutissage à chaud, d'opérer *en flan juste*, c'est-à-dire de préparer le flan avec suffisamment de précision pour qu'aucune retouche ne soit nécessaire après emboutissage. On opère donc *en flan approché* et l'on se contente de découper approximativement la tôle par cisaillage ou par oxycoupage. Si un bord doit être soumis à un étirage prononcé lors de la mise en forme, on le meule soigneusement pour éliminer les amorces de rupture.

10.5. Finition des emboutis. — La plupart des emboutis à chaud nécessitent un calibrage ultérieur. En effet, les pièces, sortant encore chaudes de presses, se déforment sous l'action de leur propre poids ou des variations locales de vitesse de refroidissement; le démandrinage lui-même contribue à les déformer. Enfin, les températures relatives de la tôle et des outillages variant à chaque opération, on obtient des variations appréciables de dimensions; en particulier, au début de la journée, les outillages sont encore froids et les pièces produites sont plus petites que celles qui sont obtenues plus tard.

L'importance des déformations qui en résultent dépend du dessin de la pièce et de l'épaisseur de la tôle; elles sont particulièrement importantes pour les pièces longues. Elles se corrigent par un travail à la main, avec ou sans l'aide d'un chalumeau de réchauffage ou d'un feu de forge. L'opération du calibrage est longue et demande une main-d'œuvre qualifiée.

Le détourage des emboutis à chaud se fait généralement par traçage suivi d'un cisaillage, d'un oxycoupage ou d'un usinage. Cette mise à hauteur peut se faire directement en chanfrein préparatoire au soudage. Des reprises peuvent être faites au burin pneumatique. Si la calamine fournie pendant l'emboutissage doit disparaître, on l'enlève par sablage ou décapage.

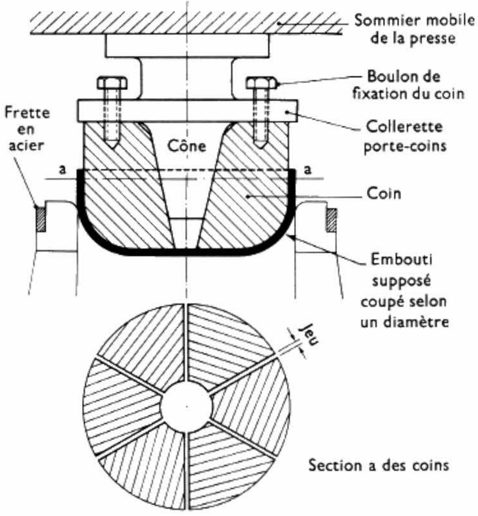
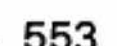


Fig. II-44 — Mandrin à segments extensibles

11. LES PRESSES

Les principaux types de presses à commande mécanique sont les suivants :

— les presses à bâti en col de cygne,



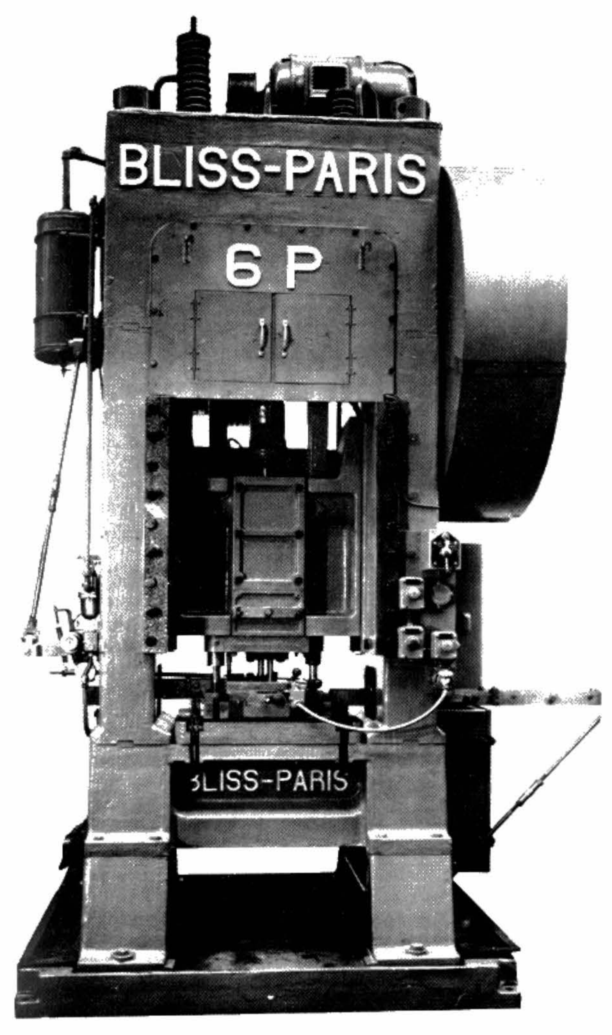


Fig. II-45 — Presse à simple action du type assemblé, équipée d'un outil d'emboutissage et d'étirage de godets et d'un amenage automatique de bandes (*E. W. Bliss*)

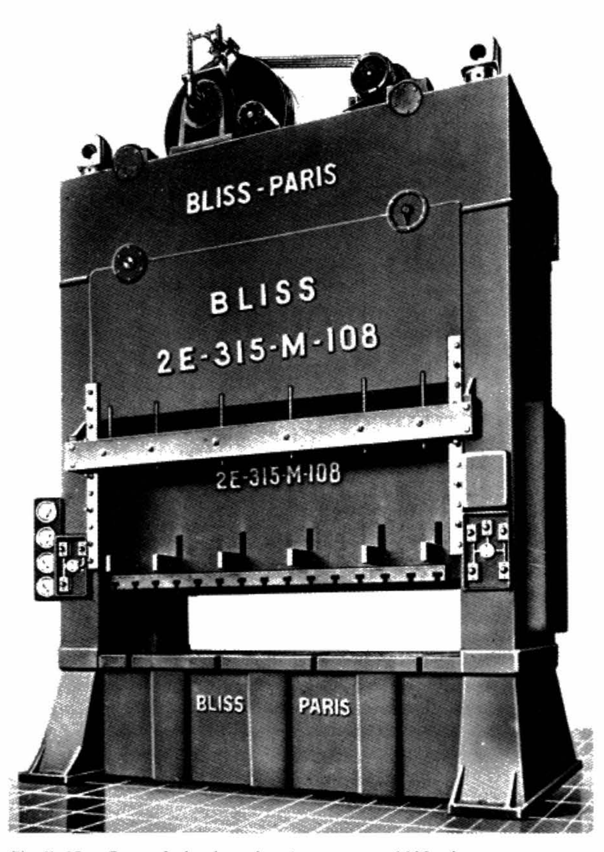


Fig. II-46 — Presse à simple action du type assemblé à arbres transversaux pour carrosserie automobile (*E. W. Bliss*)

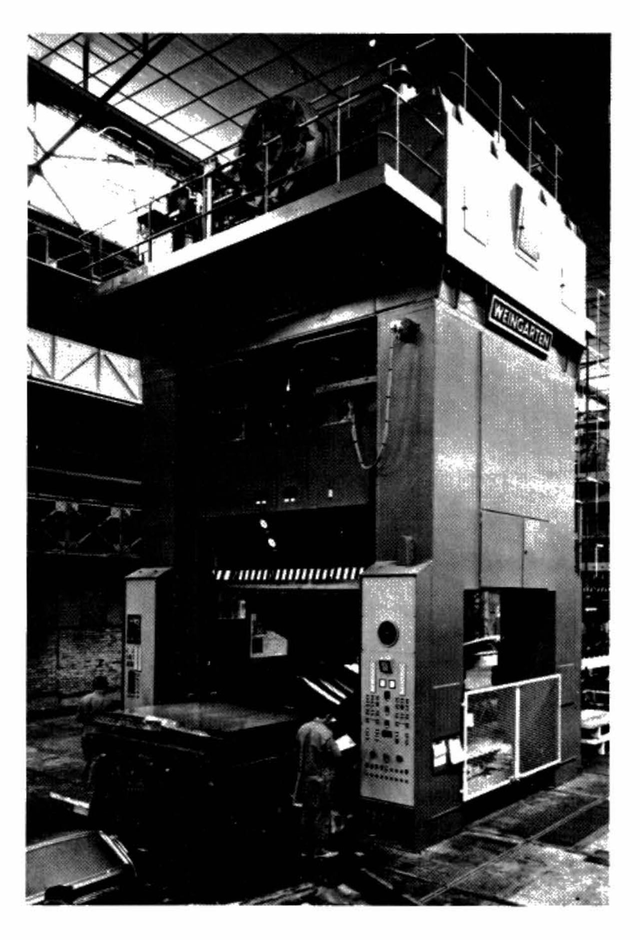


Fig. II-47 a — Presse double effet, de 12 000 kN pour emboutissage à froid de grandes pièces de carrosserie (*Weingarten-Arbel*)

— les presses à bâti en col de cygne, à bigorne et à table éclipsable,

— les presses à bâti en arcade,

— les presses à bâti assemblé à simple action (fig. II-45 et II-46),

— les presses à bâti assemblé à double et à triple action (fig. II-47 a et b),

— les presses à bâti annulaire (totalement en acier soudé)

— les presses-transfert, lesquelles comportent jusqu'à quatorze postes de travail, les commandes des organes de transfert des ébauches aux postes successifs de transformation étant mécaniques ou hydrauliques.

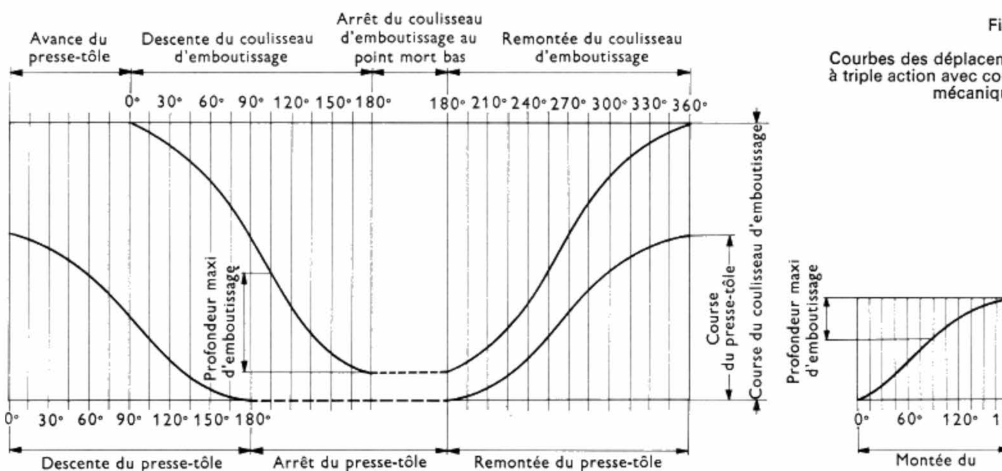
Tous ces types de machines, sauf le type à bigorne, peuvent recevoir un appareil de contre-pression actionnant le serre-flan, qu'il soit à rondelles en caoutchouc, à commande pneumatique ou hydraulique ; ils peuvent très facilement être équipés d'amenages automatiques de bandes ou de flans.

Les principaux types de presses à commande hydraulique du mouvement du coulisseau et affectées aux opérations d'emboutissage peuvent également être définis comme suit :

— les presses à bâti en col de cygne,

— les presses à bâti assemblé (à cage rectangulaire) (V. fig. II-48).

Ces modèles conçus pour une simple ou pour une double action sont équipés d'un appareil de contre-pression hydraulique.



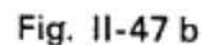
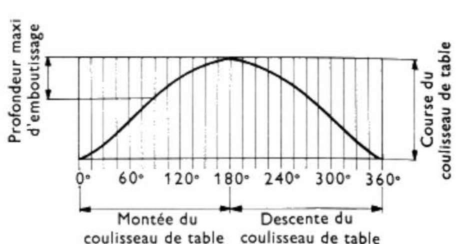


Fig. II-47 b



Courbes des déplacements d'une presse à emboutir à triple action avec coulisseau de table à commande mécanique (*Weingarten*)

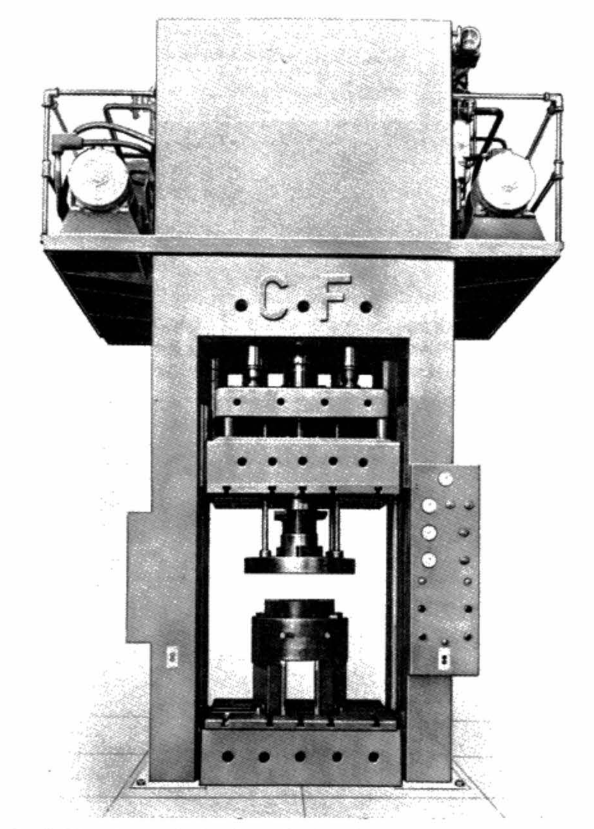


Fig. II-48 — Presse hydraulique d'emboutissage à 3 effets: serre-flan; emboutissage; étirage, pour exécution en un seul cycle d'un embouti de diamètre 130 mm, de hauteur 300 mm, et d'épaisseur 2 mm; cadence 180 pièces par heure (*Ciblat et Foubert*)

11.1. Caractéristiques particulières des presses mécaniques. — Le travail susceptible d'être réalisé par une presse mécanique est fonction de l'énergie accumulée dans son volant, énergie qui est utilisée partiellement pendant la durée de l'opération.

En général, les presses mécaniques sont caractérisées par leur force nominale qui est celle développée en bas de course de l'arbre-vilebrequin ou quelques millimètres avant ce point (cette caractéristique est souvent exprimée en tonnes, ce qui est incorrect puisque la tonne est une unité de masse et non de force. Si une presse est dite de 100 t cela signifie que sa force nominale est de 100 tf = $100 . 10^3$ daN, c'est-à-dire est égale au poids d'une masse de 100 t).

La capacité d'emboutissage est donnée par l'effort maximal que l'arbre-vilebrequin peut transmettre au coulisseau en un point donné de la course, de cette capacité on doit soustraire l'effort demandé au serre-flan.

Chaque fois que les opérations de découpage et d'emboutissage de faible profondeur (100 à 120 mm) en métaux minces sont possibles, on choisit une presse mécanique, l'impact brutal de l'outillage sur la matière ne convenant pas aux joints des presses hydrauliques.

Par ailleurs, la presse mécanique à simple action, même équipée d'un coussin pneumatique, est en général plus rapide pour les emboutissages d'une profondeur moyenne et elle nécessite un moteur de plus faible puissance que celui d'une presse hydraulique. Elle comporte un volant, pour emmagasiner de l'énergie, ce qui permet l'utilisation de la force maximale.

Toutefois, sur les presses mécaniques on ne dispose que de forces considérablement réduites en divers points d'éloignement du bas de course.

Il en est de même pour les presses mécaniques à double action, l'outil fixé au coulisseau pénètre dans la matière à une très grande vitesse; plus l'embouti est profond, plus cette vitesse risque d'être excessive.

La presse mécanique à double action est sensible aux variations d'épaisseur de la matière, ces variations pouvant provoquer des risques de déformation et même de rupture aux genouillères commandant le serre-flan supérieur.

Presses mécaniques à double et à triple action (V. fig. II-47 a). — Les presses à double action sont spécialement réservées à l'emboutissage; le coulisseau d'emboutissage (nommé souvent plongeur) est guidé dans le coulisseau serre-tôle et la remontée du coulisseau serre-tôle commence dès que le poinçon d'emboutissage a terminé son opération, cela afin de disposer d'un temps maximal pour l'évacuation de la pièce produite.

Le coulisseau serre-tôle est commandé par des genouillères dont la pression sur la tôle est uniforme pendant toute la durée de l'emboutissage.

Certaines de ces machines employées en carrosserie automobile et en aviation sont d'un volume impressionnant et, de ce fait, possèdent un bâti construit en acier soudé. La table permet le montage d'un ou plusieurs coussins pneumatiques, hydropneumatiques ou hydrauliques. Du fait de sa masse importante, à laquelle il faut ajouter la masse de la partie mobile de l'outil, le coulisseau de ces presses est équilibré pneumatiquement, cela dans l'intérêt des bielles, qui ne sont plus alors pour l'emboutissage que des points de poussée. Il faut rappeler que certains outils de carrosserie pèsent jusqu'à 80 tonnes.

11.2. Force des presses mécaniques. — Toutes les presses (munies d'un arbre-vilebrequin) de courses variées, mais d'un même diamètre d'arbre aux paliers, ont un couple de torsion constant; seule la distance du point *B* jusqu'au bas de la course *A* est variable selon la longueur de la course (fig. II-49). Les presses mécaniques devraient être caractérisées par:

— leur résistance ou la force de leur bâti, en newtons,
— le travail de leur couple de torsion en joules.

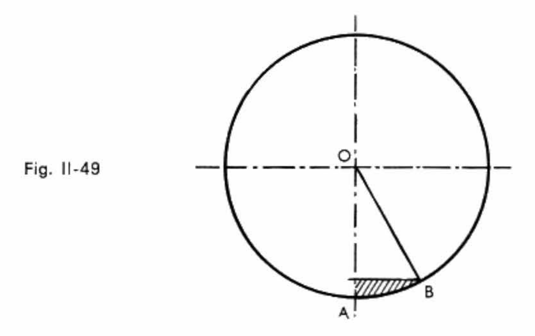


Fig. II-49

11.3. Caractéristiques particulières des presses hydrauliques. — Le cœur de ces machines est, en général, une pompe à pistons multiples qui est reliée au moteur; le débit en volume de la pompe peut être réglé depuis un minimum jusqu'au maximum grâce à un régulateur de pression.

Les presses modernes d'emboutissage accomplissent automatiquement un cycle de travail complet:

— la course descendante à vide du coulisseau ainsi que sa course de remontée sont effectuées à une vitesse accélérée;

— la vitesse d'emboutissage qui se situe entre 2 et 8 mètres par minute dépend de la pression de travail et de la puissance de la pompe, la pression de travail pouvant être appliquée à n'importe quelle position du coulisseau.

Contrairement aux presses mécaniques, les presses hydrauliques s'arrêtent automatiquement dès que la pression maximale est atteinte.

Les presses hydrauliques sont les plus répandues pour l'emboutissage à chaud; elles sont à simple ou à double effet, avec ou sans éjecteur, selon le but recherché. Leur forme varie suivant le travail demandé. La figure II-50 représente une presse longue destinée à l'emboutissage des longerons de matériel de chemin de fer tandis que la figure II-51 montre une presse carrée destinée à l'emboutissage de fonds de réservoirs.

11.4. Efforts d'emboutissage. — Cet effort est donné par la formule $E = \pi . d . e . R . K$, dans laquelle:

d est le diamètre de l'embouti à mi-épaisseur en millimètres,

e est l'épaisseur à emboutir en millimètres,

R est la résistance à la rupture de la matière en hectobars,

K est un facteur de correction qui dépend du rapport d'emboutissage $\frac{d}{D}$, D étant le diamètre du flan. Il est donné par le tableau suivant (formule de Schüler) :

K	1	0,930	0,860	0,790	0,720	0,660	0,600	0,550	0,500	0,450	0,400
$\frac{d}{D}$	0,550	0,575	0,600	0,625	0,650	0,675	0,700	0,725	0,750	0,775	0,800

11.5. Appareils de contre-pression appliquée au serre-flan. — Les appareils montés sous les tables des presses mécaniques, à simple comme à double action sont en général à rondelles en caoutchouc, à rondelles élastiques, à ressorts assemblés en parallèle, à coussin pneumatique, ou à coussin hydropneumatique.

Le type à coussin pneumatique est le plus employé car sa pression reste constante (l'idéal serait de disposer d'une pression décroissante).

Sur les presses hydrauliques à simple comme à double action, l'appareil de contre-pression est toujours à commande hydraulique; cela assure un serrage élastique de la tôle de sorte que la variété des tolérances adoptées pour l'épaisseur des tôles n'a aucune influence sur la contrepression exercée.

Par ailleurs, un régulateur de distribution permet de réduire automatiquement la pression appliquée au fur et à mesure de la réduction de la surface de métal sur le serre-flan.

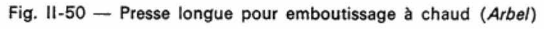
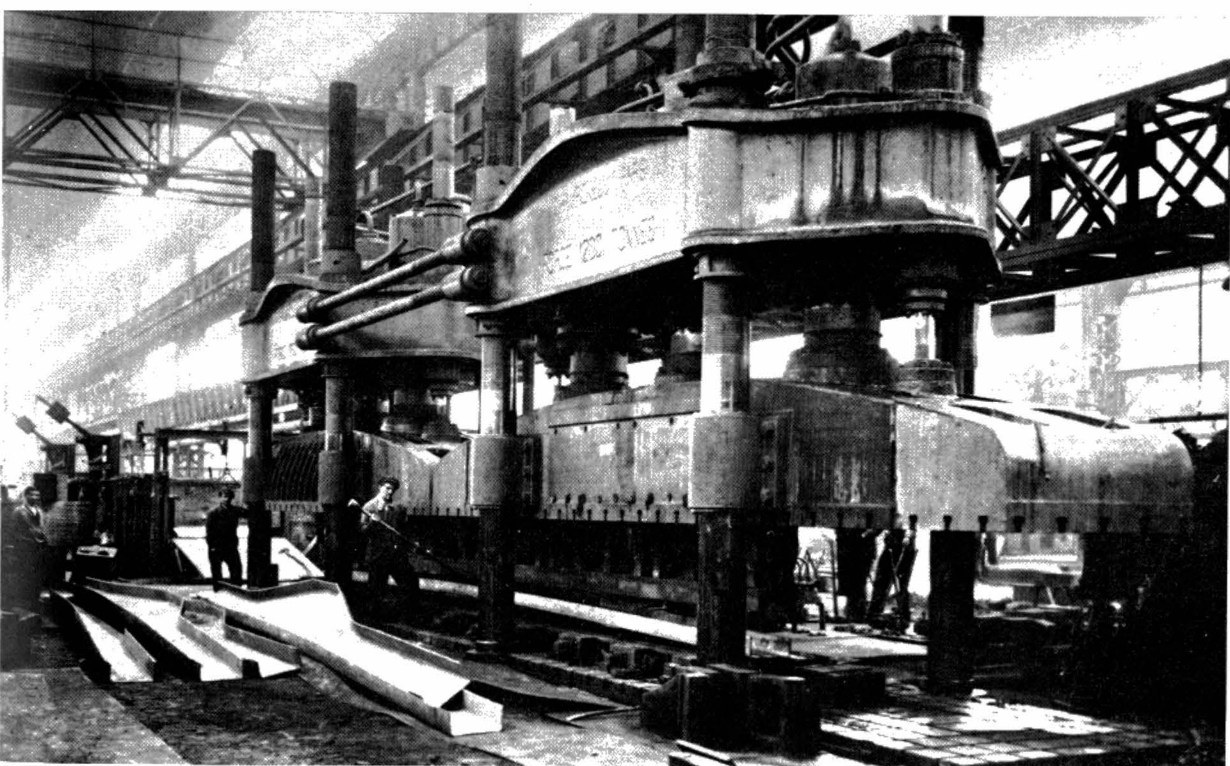


Fig. II-50 — Presse longue pour emboutissage à chaud (*Arbel*)



11.6. Influence de la pression du serre-flan. — L'effort appliqué au serre-flan qui s'ajoute à l'effort d'emboutissage doit être suffisant pour éviter tout plissement éventuel de la tôle, lequel pourrait provoquer la rupture de la collerette existante pendant la presque totalité de l'opération.

Les pressions appliquées pour la réussite de l'emboutissage de diverses matières sont les suivantes :

— aluminium A-5 .... 6 à 12 hbar
— alliage A-G3 .... 20 à 35 hbar
— alliage A-U4G .... 10 à 40 hbar
— laiton U-Z30 .... 16 à 20 hbar
— acier SS E DD .... 20 à 25 hbar
— acier inoxydable 18/8 .... 30 à 50 hbar

Les différences de ces valeurs limites pour une même nuance dépendent de la matière et de son état structural.

11.7. Vitesses maximales d'emboutissage

Tôles d'acier .... 18 m/mn
Tôles d'acier inoxydable .... 8 à 10 m/mn
Laiton .... 40 m/mn
Aluminium .... 30 m/mn
Zinc .... 10 à 12 m/mn

Pour l'exécution d'emboutissages profonds ou difficiles, l'utilisation de presses hydrauliques dont les caractéristiques permettent toutes vitesses réglables, assure l'obtention de produits de qualité supérieure.

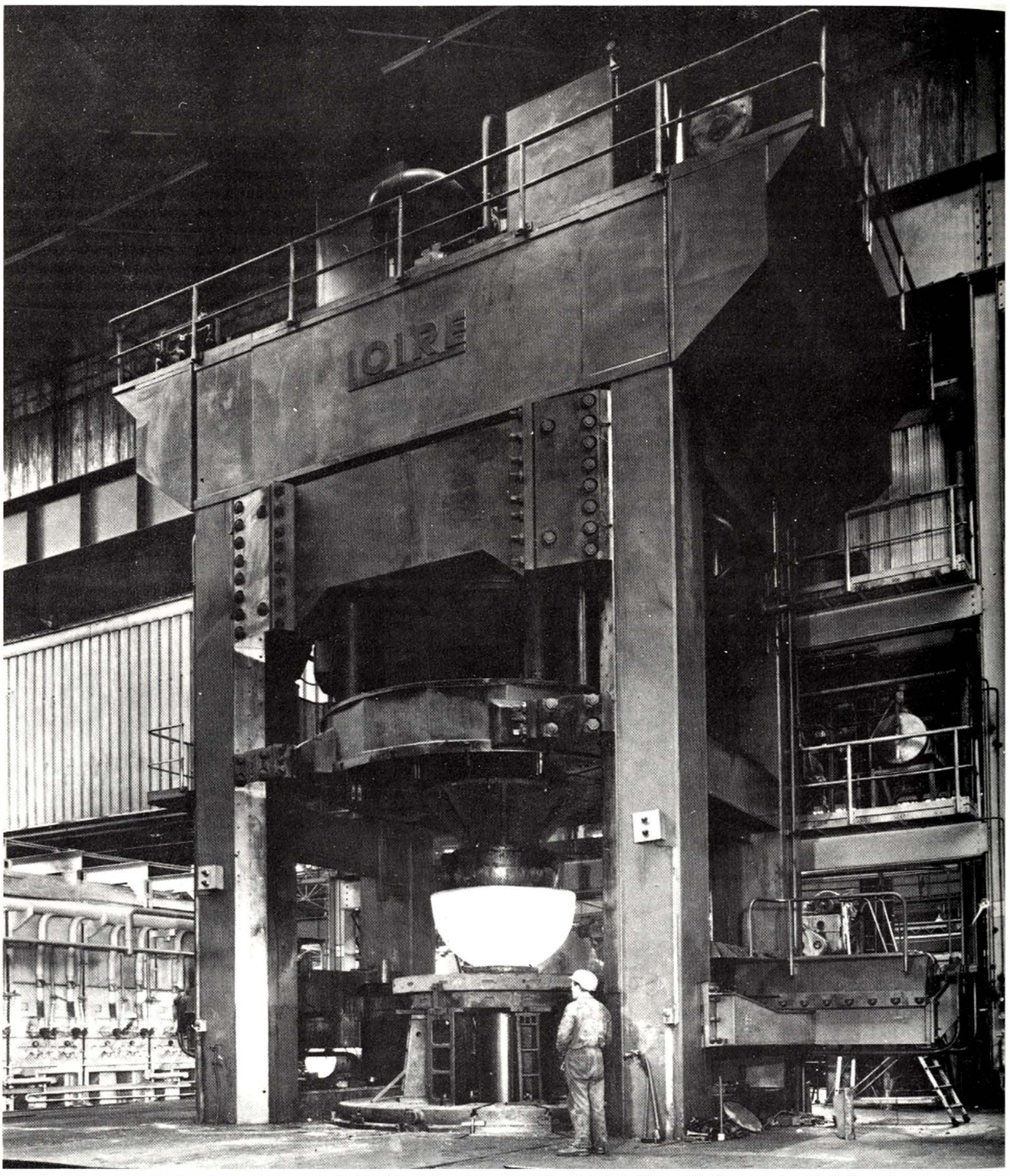
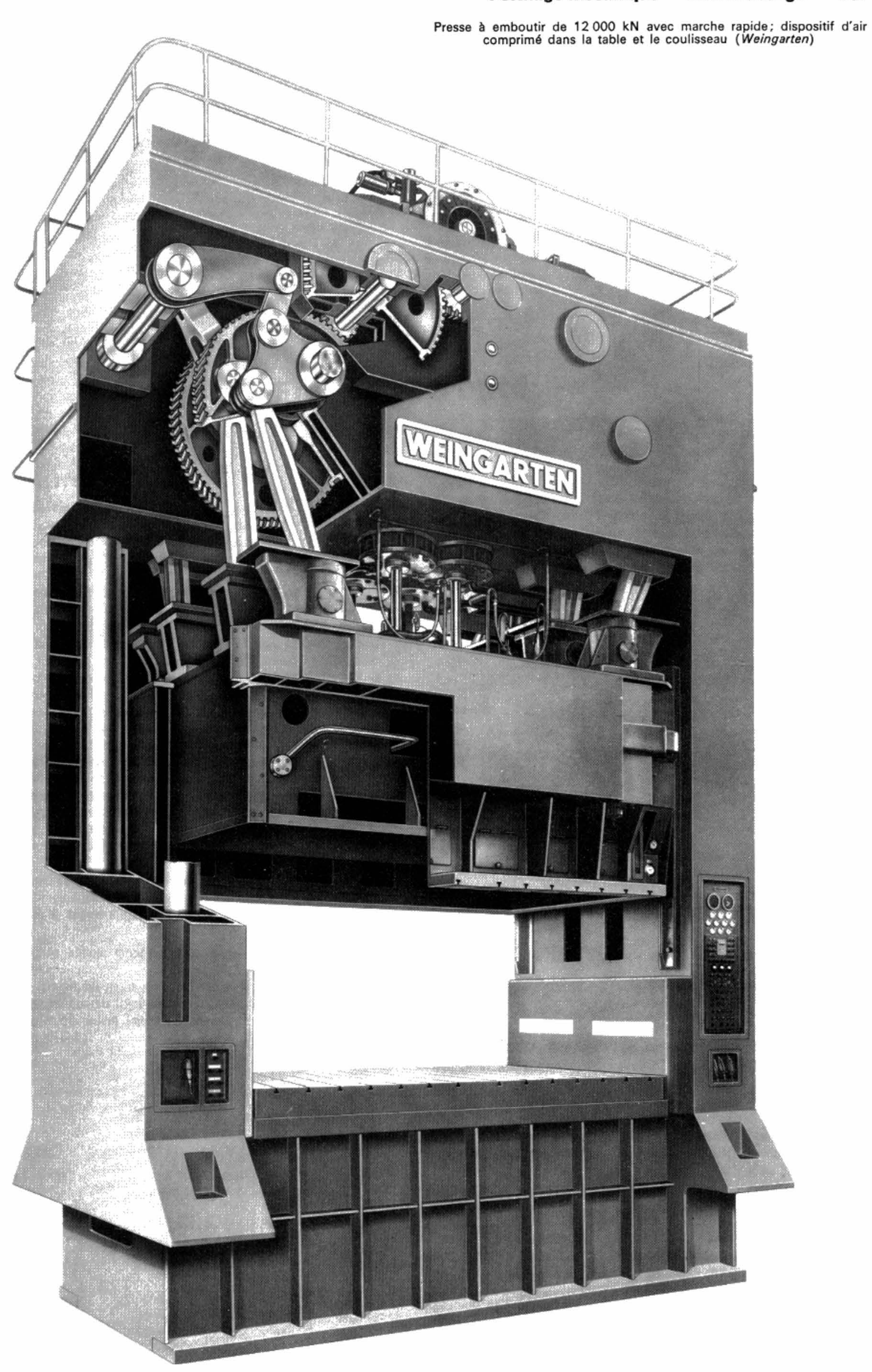


Fig. II-51 — Presse à chaud de 26 000 kN : emboutissage d'un fond hémisphérique (*Studio de Septenville-Vallourec*)

Presse à emboutir de 12 000 kN avec marche rapide; dispositif d'air comprimé dans la table et le coulisseau (*Weingarten*)



CHAPITRE III

FILAGE PAR CHOC

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Définitions. — Le filage par choc est un procédé de déformation plastique qui permet de transformer, par une seule opération de presse et généralement à la température ambiante, un lopin en produit tubulaire, cela à volume constant.

L'expression « filage par choc » n'est d'ailleurs pas absolument exacte car des résultats semblables peuvent être obtenus, sans choc, par l'emploi de presses hydrauliques. Il faut voir l'origine de cette appellation dans le fait que la déformation est très généralement obtenue avec une presse mécanique, sur laquelle le lopin subit un choc bruyant à l'impact du poinçon.

Le filage par choc se différencie essentiellement du filage ordinaire par le fait qu'il est presque toujours réalisé à la température ambiante, sur des presses mécaniques, alors que le filage ordinaire est fait à la température de recristallisation du métal et sur presses hydrauliques. De plus, la vitesse de déplacement du métal en filage par choc est nettement supérieure à celle du filage classique.

En anglais, les expressions utilisées sont « *impact extrusion* » et « *cold extrusion* ».

1.2. Procédés fondamentaux. — Dans le filage par choc on exerce sur le lopin une pression suffisante pour que le matériau flue à travers un jeu volontairement prévu dans l'outillage.

On distingue deux procédés principaux de filage par choc :

1° Le filage dit *inverse*, dans lequel l'effort est exercé sur toute la surface du lopin en contact avec le poinçon, le métal s'écoule en sens inverse de celui de la marche du poinçon (fig. III-1).

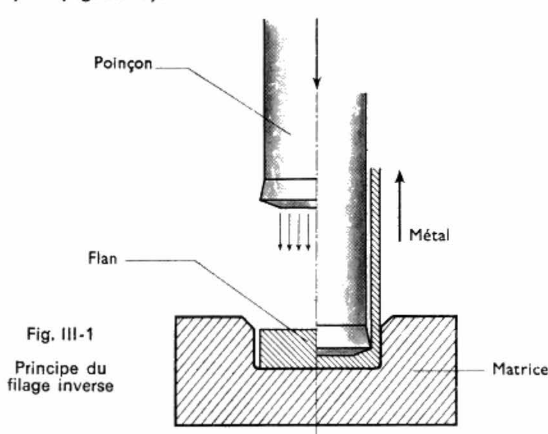


Fig. III-1

Principe du filage inverse

2° Le filage dit *direct* connu aussi sous le nom de « procédé Hooker », dans lequel l'effort est exercé sur la couronne constituant l'ébauche (tube ou lopin prématricé dont le fond ne participe pas à l'écoulement). Le métal s'écoule entre la filière et l'aiguille du poinçon dans le même sens que le déplacement de ce dernier (fig. III-2).

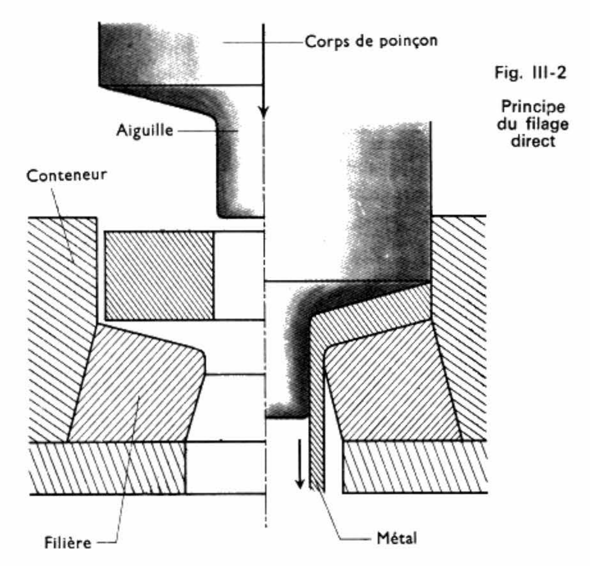


Fig. III-2

Principe du filage direct

Des variantes ou combinaisons de ces procédés ont été imaginées et certaines font l'objet de brevets (procédé Critall-Luxfer). On peut filer en direct avec un contrepoinçon, simultanément en inverse et direct, latéralement, etc.

1.3. Historique. — Contrairement à l'opinion généralement répandue, le filage par choc n'est pas une technique récente mais remonterait, d'après Pearson à 1841, date à laquelle l'Anglais John Rand prit un brevet pour la fabrication de tubes souples en plomb, à l'aide d'un balancier à main, suivant la méthode qualifiée aujourd'hui de *filage inverse*.

D'après Guzzi, ce serait même en 1797 qu'un nommé Bramah aurait déposé un brevet, amélioré par la suite, pour l'obtention de tubes en plomb, en « comprimant » un lopin préalablement chauffé, à l'aide d'un poinçon, l'effort étant appliqué au marteau à main.

Le filage inverse était connu en France dès 1855 où des tubes furent présentés par Richard à l'Exposition de Paris. Il apparaît en 1870 en Amérique, importé d'Autriche par Wirtz. Toujours d'après Guzzi, ce serait en 1915 seulement

que le procédé fut appliqué pour la première fois à l'aluminium pur, par le Suisse Neher. Cette application prit très vite de l'extension, surtout en Allemagne et aux États-Unis d'Amérique et devint commerciale dès 1920.

En 1903, alors que ce procédé de filage était déjà très répandu, tout au moins pour les métaux très malléables, un nommé George W. Lee, qui travaillait dans une manufacture de tubes souples à Binghampton (État de New York), introduisit une nouvelle méthode de filage. Son procédé connut quelques difficultés et n'obtint le visa de l'Office des brevets de Washington qu'après aménagements. Incapable d'en tirer un parti commercial, il vendit tous ses droits à un agent de brevets, Leslie Hooker, dont le nom reste attaché au procédé qui est celui qualifié de *filage direct*.

Ces procédés furent appliqués à l'aluminium pur et ensuite, après perfectionnements, aux différents alliages d'aluminium, au cuivre, aux laitons, au zinc; dès 1935 il était utilisé avec l'acier, sous le nom de procédé Neumayer.

Très récemment, le procédé a été expérimenté sur des métaux spéciaux: titane, béryllium, etc. et sur certaines matières plastiques.

Dans le domaine de la technologie, la dernière décennie a vu la présentation de techniques nouvelles qui s'apparentent au filage par choc: filage par explosion, filage hydrodynamique. Ces procédés, quelquefois très au point, n'ont pas encore atteint le stade industriel.

1.4. Avantages et inconvénients des principaux procédés

1.4.1. Filage inverse. — Dans ce procédé, le produit filé s'extrait de la matrice à la remontée du poinçon et aussi par l'effet de la dépression sous le nez du poinçon. Il est décollé de ce dernier par un extracteur.

On se trouve limité, en hauteur de produit filé, par la course de la presse, de laquelle il faut déduire (fig. III-3) la somme de:

— la profondeur de la matrice;
— l'épaisseur utile du dispositif d'extraction;
— la hauteur à rogner de l'ébauche filée;
— une réserve permettant l'éjection facile du produit.

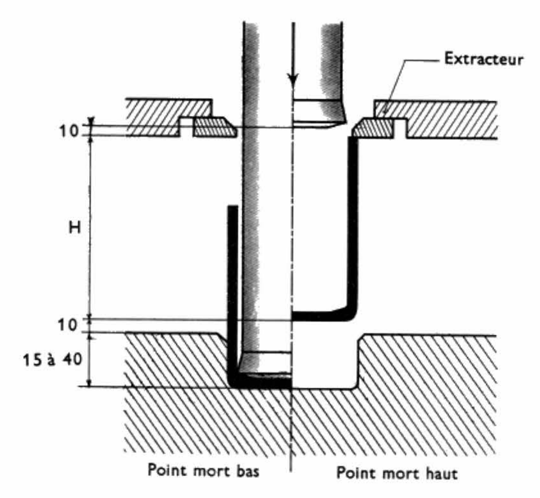


Fig. III-3 — Filage inverse; course nécessaire

On peut estimer que la hauteur maximale de la pièce filée doit être inférieure de 35 à 60 mm à la course de la presse. La course des presses à filer ne dépasse généralement pas 300 à 400 mm.

De plus, la hauteur de la pièce est limitée par l'effort de flambage subi par le poinçon. Cet effort de flambage peut être évalué à l'aide de formules qui seront données plus loin. Pour l'aluminium recuit, la pratique industrielle fixe cette limite à six ou sept fois le diamètre de la pièce filée dans le cas où elle est cylindrique. Ces chiffres peuvent parfois être notablement dépassés (10 diamètres) ou réduits (3 diamètres), suivant la nature du matériau et les difficultés d'obtention de la pièce.

En résumé, les pièces filées en inverse auront une longueur inférieure à 350 mm environ et inférieure aussi à sept fois leur diamètre.

En revanche, le filage inverse fournit la pièce finie (ou presque finie) en un seul coup de presse.

1.4.2. Filage direct. — Le filage se faisant dans le sens de déplacement du poinçon et l'éjection au travers de la table, la course de la presse peut être limitée (fig. III-4) à la somme de:

— la hauteur de l'aiguille, à peu près égale à celle de l'ébauche;
— la profondeur du conteneur, déterminée par la hauteur de l'ébauche;
— du jeu permettant facilement l'approvisionnement; soit environ à trois fois et demie la hauteur de l'ébauche.

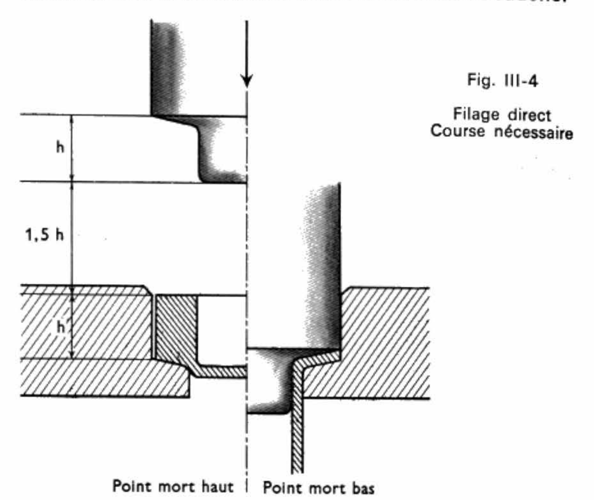


Fig. III-4

Filage direct
Course nécessaire

Dans ces conditions, des courses de 100 à 150 mm suffisent généralement et permettent d'obtenir, sans risque de flambage du poinçon, des produits atteignant couramment une hauteur de 25 diamètres et, dans certains cas, plus de 100 diamètres, hauteurs limitées seulement par les rapports de filage admissibles pour le métal considéré. Toutefois, dans le conteneur il reste un « culot de filage » qu'il faut extraire au cours d'une deuxième phase de l'opération; en principe, cela impose une deuxième révolution du vilebrequin de la presse ou l'emploi d'outillages compliqués et délicats.

En partant du pion, le filage direct nécessite donc, une opération de préparation du lopin (par matriçage par exemple) suivie d'un filage proprement dit, puis d'un découpage du culot.

Le choix de la méthode à employer est donc fonction soit des dimensions de la pièce, soit du matériel dont on dispose. Il peut résulter d'une étude économique dans laquelle l'avantage revient normalement au filage inverse, quand il est techniquement possible.

2. ÉTUDE DU FILAGE INVERSE

Le filage inverse à froid semble avoir été plus étudié dans son principe que le filage direct à froid, dont l'exécution s'apparente à celle du filage à chaud classique. De plus, le filage inverse est de très loin le plus utilisé dans l'industrie, à l'heure actuelle et pour de nombreuses années encore. Rappelons que l'opération de filage inverse est un fluage extrêmement rapide, se faisant en sens inverse du mouvement du poinçon, sous l'influence de la pression exercée par celui-ci.

2.1. Processus. — Le filage inverse nécessite les opérations suivantes (fig. III-5):

1° Introduction, généralement automatique, dans la cavité matrice, d'un lopin, appelé éventuellement flan ou pion, préalablement lubrifié; il est introduit pendant la course supérieure du poinçon (fin de la remontée et début de sa descente).

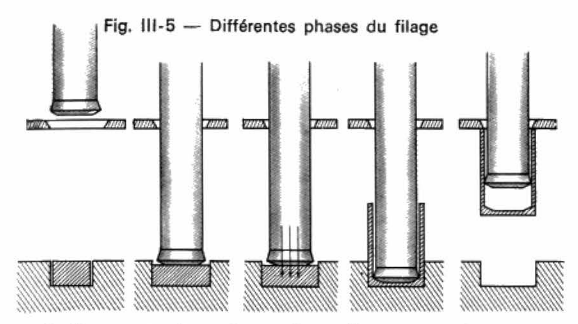


Fig. III-5 — Différentes phases du filage

2° Descente du poinçon jusqu'à sa prise de contact avec le pion qu'il comprime et oblige, par simple matriçage, à remplir complètement la cavité matrice.

3° Sous l'action du vilebrequin de la presse qui continue sa rotation, augmentation de l'effort auquel est soumis le pion, tandis que la réaction de cet effort s'exerce sur l'outillage et les éléments de la presse qui travaillent en compression et extension.

4° Pour une certaine valeur de cet effort, fluage du métal à travers l'espace annulaire réservé entre la matrice et le poinçon. On peut qualifier cette valeur, en la rapportant à la surface pressée, de « *pression de filage* ». Le vilebrequin peut alors continuer sa rotation tandis que le métal s'écoule sous le poinçon.

5° Après passage au point mort bas, le poinçon remonte, entraînant généralement avec lui le produit filé, extrait mécaniquement et chassé par différents procédés dont le plus employé est l'air comprimé.

Ce cycle, dont la durée est fonction de la rapidité de rotation du vilebrequin (de 20 à 120 rotations par minute suivant le type de la presse), ne demande que 0,5 à 3 secondes. Il ne comporte qu'une phase essentielle, celle du filage proprement dit, difficilement analysable à l'œil; elle dure rarement plus d'un dixième de seconde pour les fabrications industrielles courantes.

2.2. Analyse des différentes phases du filage. — Des essais ont été effectués par un certain nombre d'expérimentateurs pour tenter de déterminer les lois qui régissent le phénomène, par exemple, en enregistrant simultanément en fonction du temps, la variation des efforts appliqués par le poinçon et l'écrasement d'un pion en aluminium.

L'enregistrement des efforts est réalisé à l'aide de jauges extensométriques. L'écrasement du pion est déduit de la montée du métal au-dessus de la matrice, montée qui est enregistrée cinématographiquement à grande vitesse.

Le phénomène est particulièrement intéressant à étudier sur la figure III-6 représentant un enregistrement de filage sur presse hydraulique.

2.2.1. Phase de mise en pression. — Elle va de l'origine au point 5 et on peut la décomposer ainsi :

— De 0 à 1 : montée de la pression du piston hydraulique, aboutissant au remplissage de la matrice par matriçage du pion (rattrapage du jeu).

— De 1 à 5 : augmentation plus ou moins rapide de l'effort sur le pion, sans écrasement sensible de ce dernier. Les différentes vitesses d'augmentation de la pression peuvent être expliquées par la mise sous tension non uniforme des différents éléments de l'outillage et de la presse. Le palier 1-2 semble être un rattrapage de jeu.

2.2.2. Phase de filage. — Du point 5 au point 9, le filage se produit en différentes phases :

— De 5 à 6 : la vitesse d'écrasement augmente, tandis que celle de la montée en pression diminue pour s'annuler en 6. La *pression de filage* est atteinte au point 5 et le filage commence.

— De 6 à 7 : le filage se poursuit à vitesse sensiblement constante, tandis que la pression exercée par le poinçon diminue. On peut expliquer cette diminution de pression par la rapidité d'écoulement du métal ; elle permet un écrasement du pion plus rapide que la vitesse normale de descente du poinçon. Il y a alors relâchement des contraintes dans l'outillage et dans la presse.

— De 7 à 8 : le filage est arrêté, la pression en 7 étant devenue inférieure à la pression de filage. Elle remonte progressivement en remettant en contrainte l'outillage et les éléments de la presse, comme il l'a déjà été constaté de 4 à 5.

— De 8 à 9 : la pression de filage étant à nouveau atteinte en 8, l'écoulement reprend tandis que l'effort diminue jusqu'à devenir insuffisant en 9, pour les mêmes raisons qu'au point 7. On peut constater que la pression de début de filage en 8 est sensiblement la même qu'en 5, de même que l'arrêt de l'écoulement se produit pour le même effort qu'en 7.

2.2.3. Phase de détente. — Dès l'arrêt du filage, la pression monte à nouveau de 9 à 10 ; l'épaisseur restant à filer étant très faible, la pression de réglage est insuffisante pour faire fluer de nouveau le métal et le déclenchement automatique de la presse se produit : la pression diminue de 10 à 11. C'est entre ces deux points que se situe la détente.

Les mêmes essais, repris sur presse mécanique (matériel habituellement utilisé dans l'industrie) ont permis le tracé de courbes (fig. III-7) où l'on retrouve des phénomènes comparables à ceux enregistrés sur presse hydraulique, modifiés en fonction des conditions de fonctionnement particulières à la presse mécanique.

L'intégration du diagramme effort-écrasement permet d'évaluer le travail absorbé dans le filage par choc. Cela a conduit à admettre que la température du métal est voisine

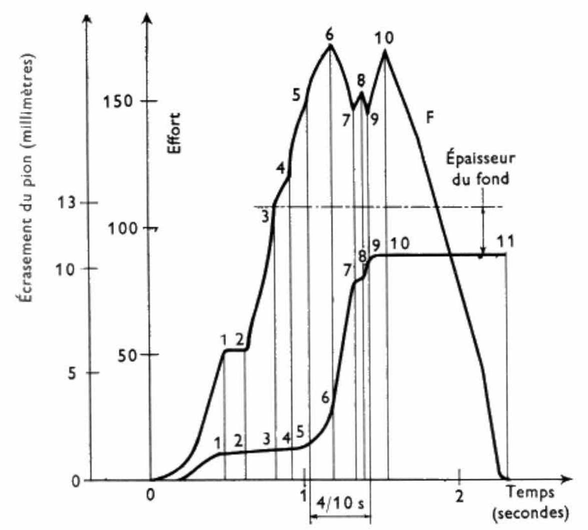


Fig. III-6 — Courbe de filage (presse hydraulique)

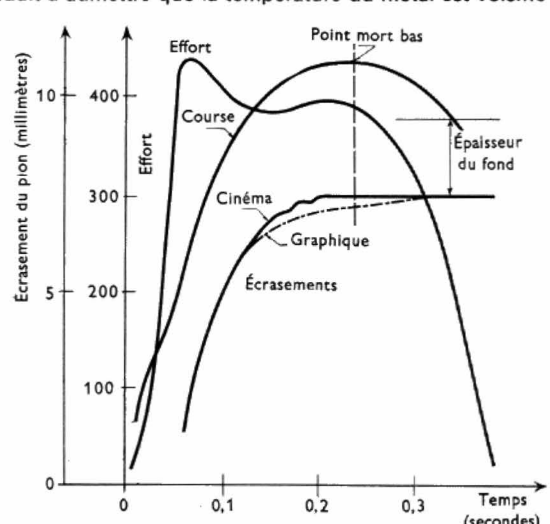


Fig. III-7 — Courbe de filage; faible épaisseur du fond

(Les efforts sont exprimés en milliers de daN : 1 000 daN = 10 kN) La courbe F représente la variation de l'effort appliqué au pion en fonction du temps

Fig. III-8

Étude du fluage (filage horizontal)

de 200 °C pour l'aluminium pur, toutes les pertes calorifiques étant négligées. Il ne peut donc pas y avoir fusion même pendant un temps très court, celle-ci nécessitant la dégradation en chaleur d'une énergie bien supérieure à celle mise en œuvre. Cela montre aussi que la déformation plastique a lieu à une température inférieure à la température de recristallisation du métal : le produit obtenu est ainsi partiellement écroui, ce qui se vérifie parfaitement à l'expérience.

2.3. Étude du fluage. — La figure III-8 représente un exemple : en *a*, on voit la subdivision du lopin en volumes ou surfaces élémentaires repérées par le numéro de leurs sommets ; en *b*, on montre l'allure de la déformation pour un filage arrêté à une épaisseur résiduelle de fond de 25 mm, et, en *c*, celle du filage complet jusqu'à une épaisseur résiduelle de 6 mm. Sur cette figure, il y a lieu de remarquer la modification de la ligne droite (ou du cylindre droit) 4-12-20-28-36-44 qui, pour un filage à fond résiduel relativement mince, vient intéresser les surfaces intérieure et extérieure de l'étui ; cela permet d'expliquer certains défauts de surface dans la paroi de l'étui voisine du fond.

2.4. Étude des efforts en filage inverse. — Le principal intérêt de cette étude se trouve dans la compréhension du phénomène. Il faut partir du principe que *plus l'effort spécifique sera grand, plus la difficulté du filage sera grande*, d'où les outillages seront usés plus rapidement, les cadences de fabrication devront être plus faibles, le dessin des pièces devra être plus simple.

Ces efforts sont une fonction plus ou moins complexe de nombreux facteurs dont il convient d'analyser séparément l'influence.

2.4.1. Influence des différents facteurs. — L'étude de la réalisation d'un étui cylindrique, de révolution, de diamètre D (on confond ici les valeurs des diamètres extérieur et intérieur), d'épaisseur de paroi e, de hauteur H, obtenu à partir d'un pion de hauteur h, met en évidence l'influence de différents paramètres pour un métal se prêtant bien au filage comme l'aluminium.

1° *Influence de l'épaisseur résiduelle du fond.* — Des essais montrent que, pour l'aluminium tout au moins, l'effort de filage, donc la difficulté du filage, est indépendant de l'épaisseur résiduelle du fond de l'étui, tout au moins tant que cette épaisseur ne devient pas inférieure à une certaine valeur que nous appellerons « *fond normal* ». L'épaisseur du fond normal est sensiblement égale ou un peu supérieure à l'épaisseur de paroi e de l'étui (fig. III-9).

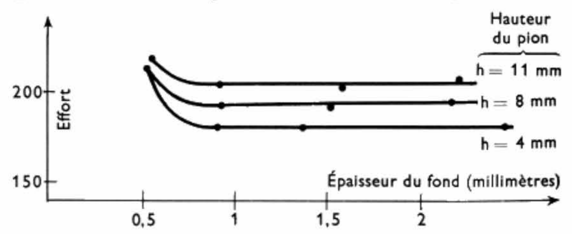
Il faut conclure de ces essais que l'obtention d'étuis à fond mince, disons plus mince que l'épaisseur des parois, est délicate ; pour un fond inférieur à l'épaisseur des parois la tenue des outillages sera problématique. Sans qu'il soit impossible d'obtenir, théoriquement, un étui dont le fond soit inférieur à la valeur normale, dans la suite, nous ne retiendrons, comme valeur de l'effort de filage, que celle d'un étui avec fond résiduel supérieur ou égal au fond normal.

2° *Influence du diamètre D.* — L'effort nécessaire est proportionnel à la surface du poinçon ou bien à la surface du lopin ce qui n'est pas très différent. Cela donne un sens bien précis à l'expression « pression de filage », quotient de l'effort par la section du poinçon.

En fait, c'est la valeur de la pression de filage qui caractérise la difficulté technologique. Il n'est pas plus difficile de filer un étui de 100 mm de diamètre que de 10 mm de diamètre, toutes choses homothétiques par ailleurs. La seule différence réside dans la force de la presse nécessaire qui sera 10^2, c'est-à-dire 100 fois plus grande dans le premier cas ; mais à force de machine suffisante les deux étuis seront aussi faciles à obtenir.

3° *Influence de la nature du métal.* — L'effort de filage varie évidemment avec la nature du métal à filer.

De nombreux auteurs se basant sur les lois de la plasticité des métaux font intervenir la « *résistance à la déformation* » R_d. Cette caractéristique est définie comme égale à la plus



Courbe Effort-Épaisseur du fond pour e = 0,5 mm

Courbe Effort-Épaisseur du fond pour e = 1 mm

Fig. III-9 — (Les efforts sont exprimés en milliers de décanewtons)

grande différence des tensions principales, lorsque le métal se met en écoulement plastique ; c'est aussi le double de la tension de cisaillement d'après le cercle de Mohr. Toutefois, contrairement à ce qui se passe dans le travail à chaud, dans la déformation à froid la résistance du métal à la déformation n'est pas constante. Sa valeur dépend essentiellement de la valeur de la déformation que l'on fait subir au métal, de la température, de la vitesse et aussi de la manière dont l'effort est appliqué. La relation entre la valeur de la résistance du métal à la déformation et la valeur de cette déformation a été déterminée dans certains cas particuliers (fig. III-10). Dans la pratique, la valeur de R_d doit donc être affectée d'un coefficient expérimental, appelé *degré d'efficacité*, pour être introduite dans les formules d'effort de filage.

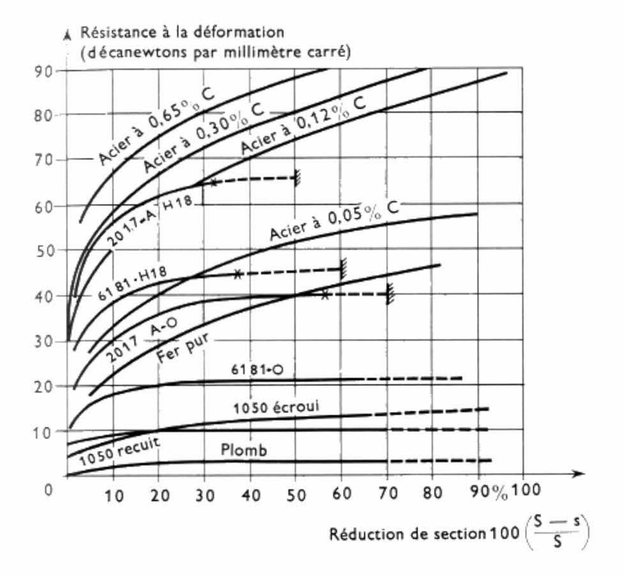


Fig. III-10 — Résistance des métaux à la déformation en filage à froid

Les difficultés de détermination de la valeur pratique de ce coefficient ont amené à rechercher un critère plus facilement mesurable. Les mesures expérimentales rassemblées sur le tableau I montrent que, sauf pour le cuivre dans le domaine d'utilisation habituel, l'effort de filage est sensiblement proportionnel à la dureté Brinell H_B prise à la bille de 10 mm, sous une charge de 5 000 N appliquée pendant 15 secondes (fig. III-11).

Pour les non-ferreux, sauf le cuivre qui ne cristallise pas dans le même réseau, la prise en considération de la dureté Brinell paraît très rationnelle : en effet, plus l'empreinte de la bille Brinell sera grande, plus le poinçon de filage par choc pourra s'enfoncer aisément dans le lopin.

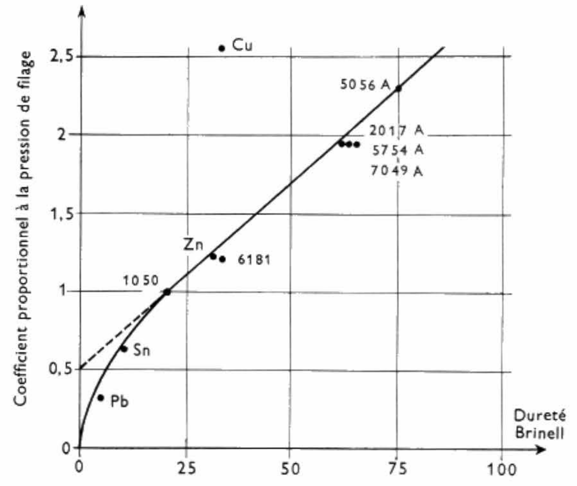


Fig. III-11 — Relations entre l'effort de filage et la dureté Brinell

4° *Influence de l'épaisseur de paroi.* — Dans le filage à chaud, l'on démontre et l'on vérifie généralement que la pression de filage est une fonction logarithmique du rapport $\frac{S}{s}$ de la section S en amont de la filière et de la section s en aval.

Dans le filage par choc inverse, S est la section du lopin (ou de la matrice) et s la section du produit filé (πDe pour un étui cylindrique). Différents auteurs montrent que le filage par choc obéit à cette loi générale (V. fig. III-12, III-13) d'allure exponentielle.

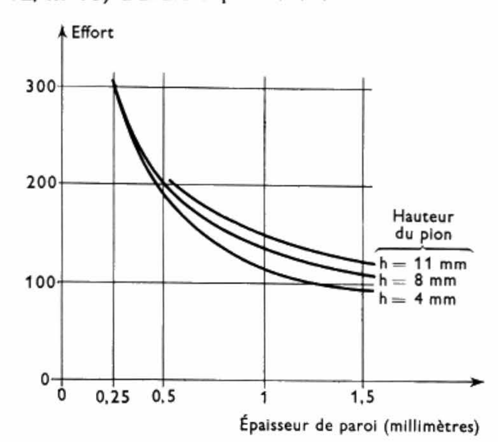


Fig. III-12 — Effort de filage en fonction de l'épaisseur de paroi (Les efforts sont exprimés en milliers de décanewtons)

Tableau I

Matière	Limite d'élasticité (daN/mm²)	Charge de rupture (daN/mm²)	Allongement (%)	Dureté Brinell	Effort de filage pour une épaisseur de paroi de : 0,65 mm (daN/mm²)	0,8 mm (daN/mm²)	1 mm (daN/mm²)	Coefficient proportionnel à l'effort
Plomb				5	17	15,5	12,5	0,27
Étain	2,2	4,4	30	9	35	31,5		0,56
Aluminium 1050* (A5)	4,3	7	33	19	62,5	56	41	1
Zinc	3,9	4,1	1	36		72,5		1,29
6181 (A—SG)	4	12	32	35	80	72,5		1,29
5754 (A—G3)	13,5	27,6	17	61	123,5	110	79	1,96
2017 (A—U4G)	8,6	21,4	17	61		109	82	1,95
7049 A (A—Z8GU)	13,3	22,1	17	60		110	79	1,96
5056 A (A—G5)	18,4	36,4	15	71		131	99	2,34
Cuivre	3,3	20,7	50	36		141	105	2,52

(*) Désignation numérique des aluminiums et alliages de transformation définie par la norme NF A 02-104 (novembre 1970), obligation à partir du 1er janvier 1976.
Les aluminiums et alliages d'aluminium de fonderie ou destinés à la réalisation des pièces de fonderie restent désignés conformément à la norme NF A 02-004 (désignation alphanumérique).

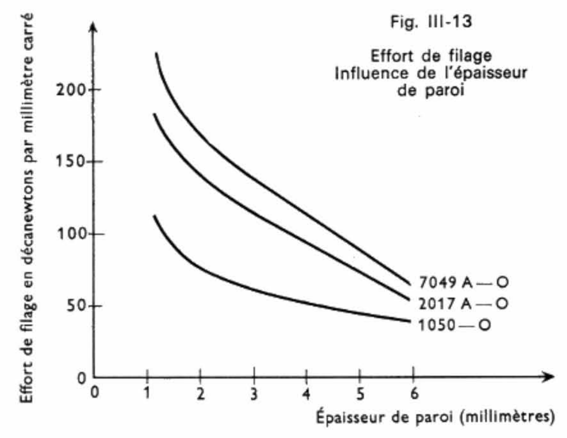


Fig. III-13

Effort de filage
Influence de l'épaisseur de paroi

De ces résultats, nous pouvons donc conclure que dans le domaine des étuis à parois minces, la pression de filage $\frac{F}{S}$ est proportionnelle à $\ln \frac{S}{s}$. Il est donc d'autant plus difficile d'obtenir un étui en filage par choc que le rapport $\frac{S}{s}$ est plus grand.

5° *Influence de la hauteur du pion h.* — Si l'on veut accroître la hauteur H de l'étui en modifiant la hauteur h du pion, on constate que l'effort de filage augmente en même temps que l'épaisseur du pion (V. fig. III-9 et III-12). La loi de variation n'est pas linéaire et il semble raisonnable de lui supposer une allure logarithmique. Toutes choses égales par ailleurs, il est un peu plus difficile de filer par choc un lopin épais qu'un lopin mince, tout au moins dans le domaine où la hauteur du pion est nettement supérieure à l'épaisseur normale du fond définie ci-dessus.

2.4.2. Formules de l'effort en filage inverse. — De nombreux auteurs ont proposé des formules prenant en compte la section du poinçon, la nature du métal, le plus souvent le rapport logarithmique de la section du lopin à la section du produit filé et quelquefois la hauteur initiale du lopin et l'épaisseur de paroi.

Le développement de ces différentes formules dépasse le cadre de cet ouvrage. Il faut toutefois mentionner l'abaque d'Hornauer, (fig. III-14) très facile d'emploi et dont les résultats sont parfaitement applicables à l'aluminium et aux étuis à paroi mince, de loin les plus fréquemment produits industriellement en filage inverse.

2.4.3. Travail absorbé en filage inverse. — L'intégration du diagramme de la figure III-7 permet de calculer l'énergie absorbée par le filage du métal. Cette énergie est proche de 80 à 85 % du produit de l'effort maximal de filage par la hauteur écrasée du lopin (c'est-à-dire la hauteur initiale du lopin diminuée de l'épaisseur résiduelle du fond).

Si l'on rapporte l'énergie absorbée à la masse du lopin, pour l'aluminium pur on trouve un nombre voisin de 150 J/g.

3. ÉTUDE DU FILAGE DIRECT

À notre connaissance, très peu d'études ont été entreprises sur le filage direct à froid, tant en ce qui concerne le phénomène lui-même que les efforts mis en jeu. On dispose surtout sur ce sujet des études réalisées sur le filage à chaud.

Deux nomographies sont proposées par *V.D.I. Arbeitsblatt Nr 5-3138* pour calculer la pression de filage en direct de corps pleins et de produits tubulaires. Cette pression varie dans le même sens que la réduction de section.

En fait, en filage direct le principal problème est de fixer à l'avance, à une valeur judicieuse la réduction de section, dont il est parlé ci-après. Cette valeur doit entraîner une pression de filage suffisante, pour obtenir un écrouissage correct du métal, mais pas trop grande pour la tenue des outillages.

4. RÉDUCTION DE SECTION

Il y a lieu de définir d'abord très exactement les diverses expressions qu'on peut rencontrer et qui, d'ailleurs, se déduisent aisément les unes des autres. Les expressions que nous donnons ici sont valables pour les deux procédés de filage, inverse et direct (fig. III-15). Nous appelons :

$$S = \frac{\pi\,(\varnothing M)^2}{4} \text{ ou } S = \frac{\pi}{4}\left[(\varnothing C)^2 - (\varnothing P)^2\right]$$

la section de l'ébauche qui, à peu de choses près, est aussi l'aire sur laquelle se développe l'effort du poinçon et :

$$s = \pi De$$

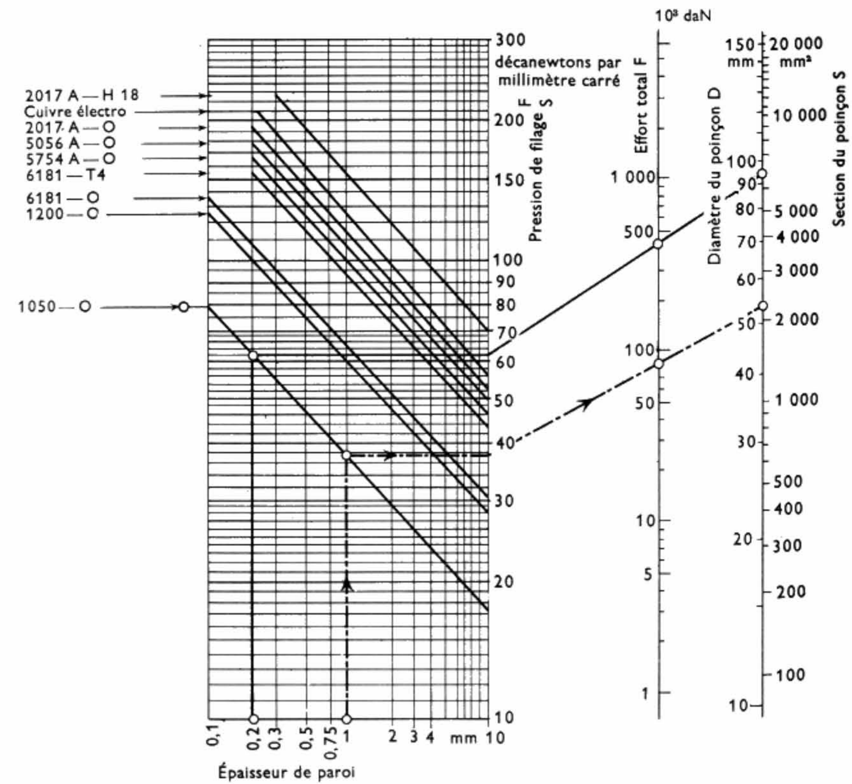


Fig. III-14

Abaque d'Hornauer pour le filage inverse

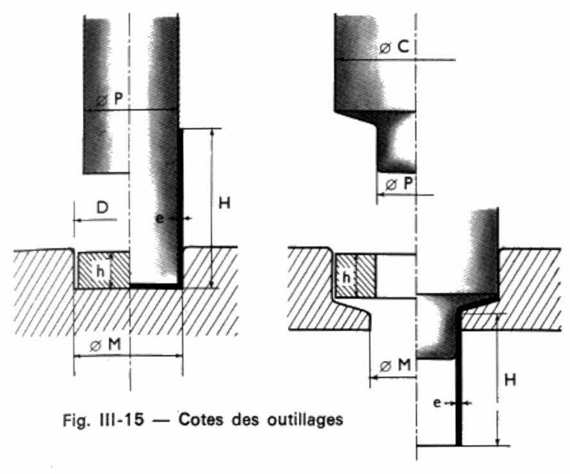


Fig. III-15 — Cotes des outillages

avec : $D = \dfrac{\varnothing M + \varnothing P}{2} \approx \varnothing P \approx \varnothing M$, la section filée du produit.

La *réduction de section* est le rapport $\frac{S}{s}$ toujours supérieur à l'unité ; $\frac{S}{s}$ est le rapport des sections. La variation relative de surface : $\frac{S - s}{S} = 1 - \frac{s}{S}$ appelée *coefficient de réduction* est le plus souvent exprimée en pourcentage. La réduction de section est généralement caractérisée par la valeur du logarithme népérien du rapport $\frac{S}{s}$.

En filage inverse, la réduction de section $\frac{S}{s}$ est entièrement déterminée par les cotes géométriques de la pièce à réaliser : le problème se ramène donc à la connaissance de l'épaisseur de paroi minimale *e* pour un diamètre et un alliage déterminés. Le tableau II ci-après indique quelques limites.

En fait, la réduction maximale dépend aussi de la valeur absolue de l'épaisseur de paroi.

Tableau II

Métal	Diamètre du poinçon ⌀ (mm)	Hauteur max. du produit	Épaisseur minimale du fond	Épaisseur minimale de la paroi	$\left(1 - \frac{S}{s}\right) 100$	$\ln \frac{S}{s}$	$\frac{S}{s}$
Plomb, étain, zinc à chaud	0 à 10	7 ⌀	0,040 ⌀	0,02 ⌀	92 à 99	2,5 à 4,5	12 à 89
	10 à 20	7 à 6 ⌀	0,035 ⌀	0,02 ⌀	93 à 99	2,6 à 4,5	
Aluminium 1050 (A5)	20 à 40	6 à 5 ⌀	0,030 ⌀	0,01 ⌀	95 à 99	3 à 4,5	
6181, 5005, 3003 (A-SG, A-G1, A-M) recuits	40 à 60	5 à 4 ⌀	0,020 ⌀	0,01 ⌀	96 à 99	3,1 à 4,5	
Magnésium à chaud	60 à 80	4 à 3 ⌀	0,017 ⌀	0,01 ⌀	98 à 99	3,9 à 4,5	
	80 à 100	4 à 3 ⌀	0,015 ⌀	0,01 ⌀	98 à 99	3,9 à 4,5	
	100 à 120	3 ⌀	0,012 ⌀	0,01 ⌀	96 à 98	3,1 à 3,9	
2017, 5754, 5056 (A-U4G, A-G3, A-G5)	20 à 40	3 ⌀	0,060 ⌀	0,07 ⌀	75	1,4	4 à 5
Cuivre, laitons U-Z10 et U-Z30	40 à 60	2 ⌀	0,050 ⌀	0,05 ⌀	80	1,6	
Acier à chaud	60 à 80	2 ⌀	0,040 ⌀	0,05 ⌀	80	1,6	
Laiton U-Z40	40 à 60	1,5 ⌀	0,150 ⌀	0,07 ⌀	70	1,2	3,3
Acier à carbone < 0,2 % à froid	60 à 80	1,7 ⌀	0,100 ⌀	0,07 ⌀	70	1,2	

En filage direct nous avons déjà vu qu'il y a lieu de se fixer la réduction de section afin de déterminer les dimensions du conteneur qui permettront un filage optimal.

Les chiffres généralement cités sont rassemblés dans le tableau ci-après.

Métal	$1 - \frac{S}{s}$	soit $\frac{S}{s}$
Plomb, étain, aluminium 1050 (A5) alliages 3003 et 6080 (A-M et A-SG)	95 à 99 %	21 à 100
2017 (A-U4G) cuivre, acier fin à carbone < 0,1 %	90 à 95 %	10 à 21
Laiton U-Z30, acier à carbone < 0,20 %	75 à 85 %	4 à 7

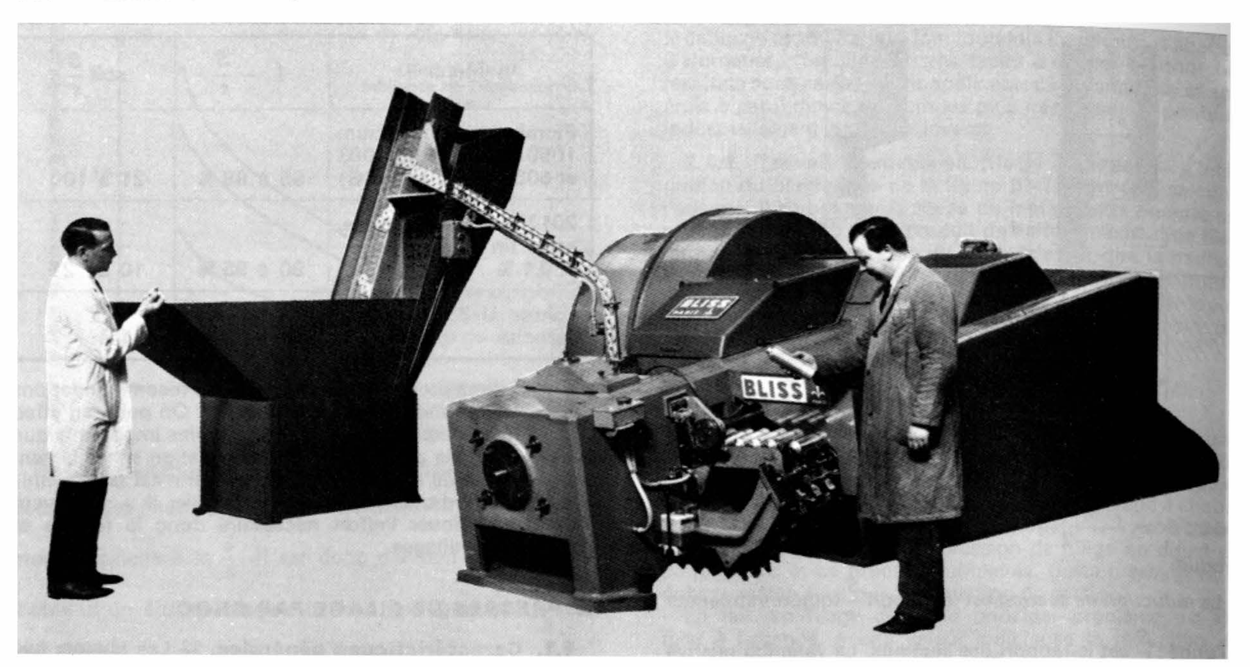
Ces chiffres proposés ne sont que des recommandations pour un filage industriellement rentable. On peut, en effet, obtenir des pourcentages de réduction plus importants que ceux cités, mais au prix d'une augmentation sensiblement exponentielle de l'effort de filage, ce qui n'est pas techniquement interdit. En pratique industrielle, il y a souvent intérêt à diminuer l'effort nécessaire donc la fatigue et l'usure des outillages.

5. PRESSES DE FILAGE PAR CHOC

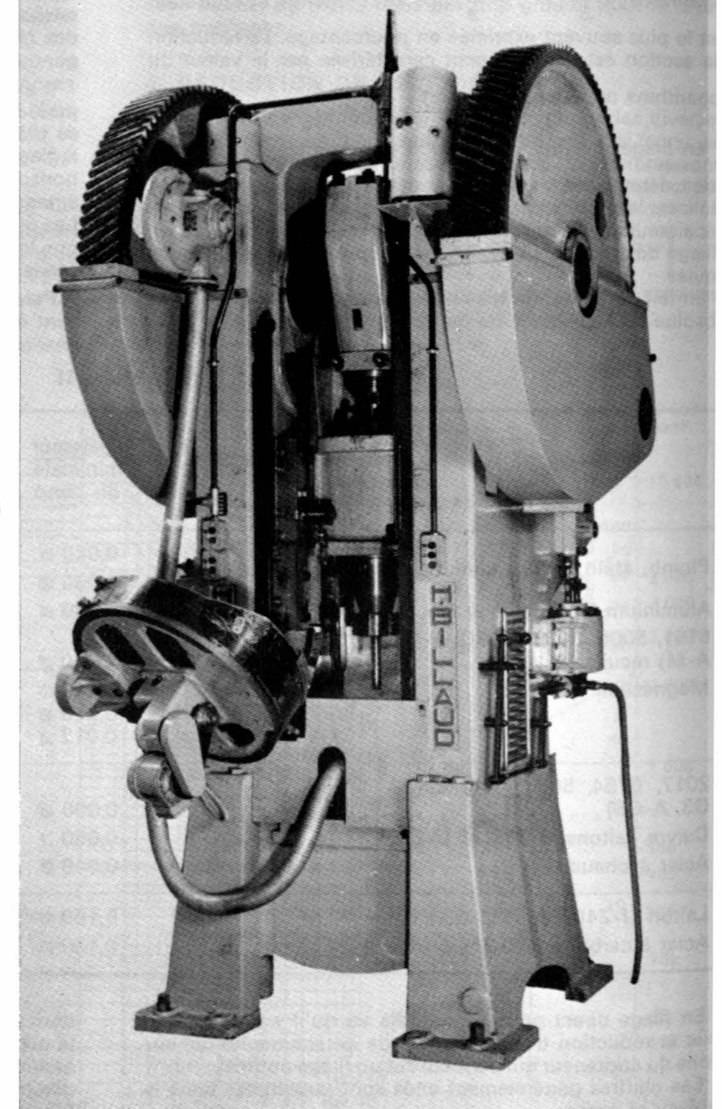
5.1. Caractéristiques générales. — Les presses hydrauliques, bien que susceptibles de permettre le filage à froid ne sont pas employées pour la fabrication en série, en raison de leur faible cadence de travail. On utilise en général des presses mécaniques à vilebrequin, à excentrique ou à genouillère.

Il existe deux types de presses pour filage par choc : les presses verticales et les presses horizontales. Les premières se prêtent mieux à la multiplicité des fabrications, car les réglages d'outillage y sont plus aisés que sur les presses horizontales. En revanche, ces dernières permettent des amenages par gravité et des éjections de pièce plus faciles. Les presses horizontales sont de loin les plus utilisées puisque le filage par choc est surtout employé pour les grandes séries.

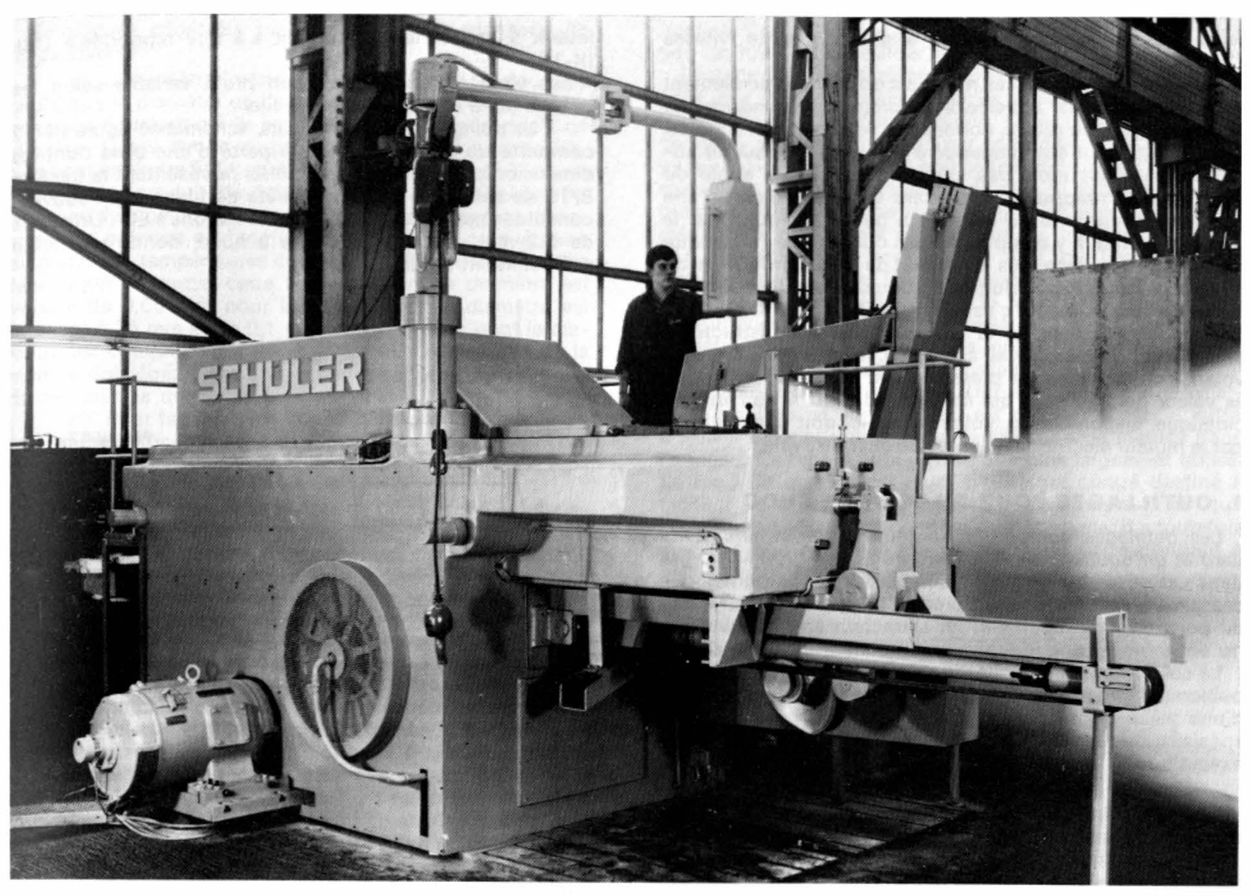
Pour permettre un travail en série, toutes les presses doivent être équipées d'un dispositif d'amenage automatique dont le modèle varie suivant les constructeurs et le type de la presse. Un jet d'air comprimé ou un dispositif de pince assure l'évacuation du filé extrait du poinçon. La cadence des presses à filer dépend de leur course et de leur force. Elle varie entre 40 et 120 coups par minute. Les construc-



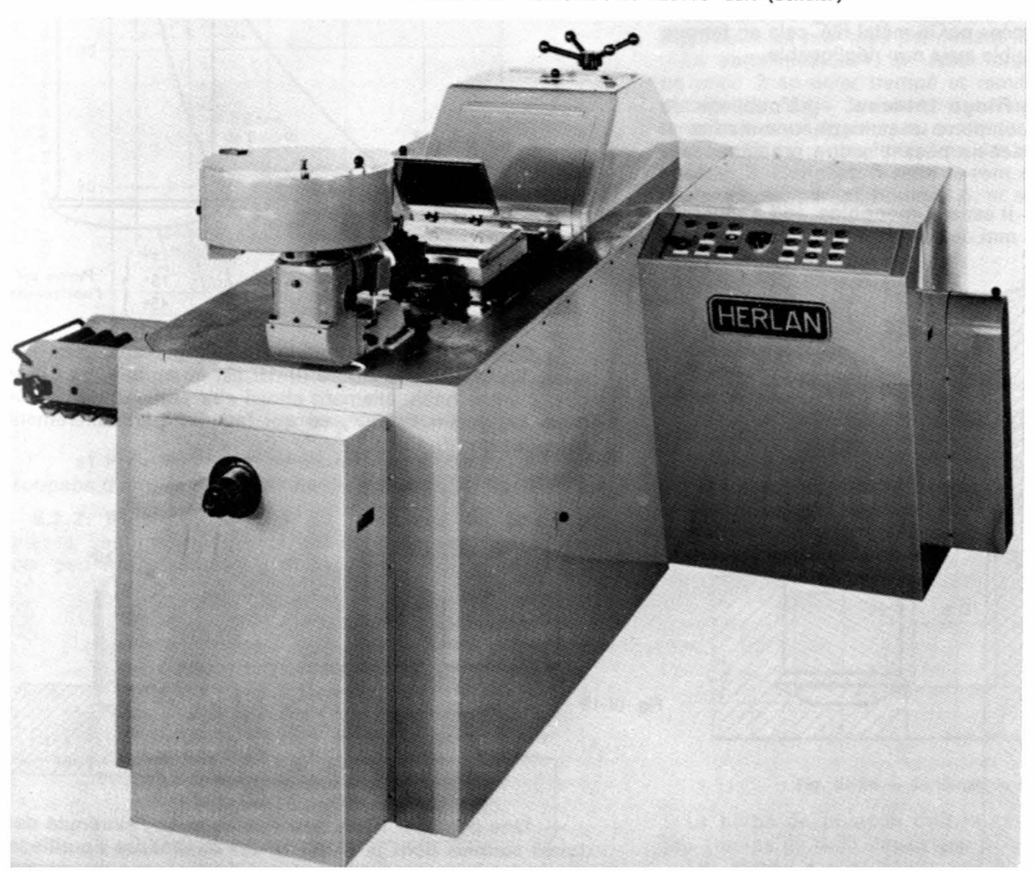
Presse à filer le métal à froid ; coulisseau horizontal ; cadence : 160 pièces par minute ; force : 400.10³ daN ; distribution des flans et évacuation des pièces filées (ici, bombes aérosols) automatiques (*E. W. Bliss*)



Presse à filer verticale avec son amenage automatique (*Billaud*)



Presse à filer horizontale de 120.10^3 daN (*Schüler*)



Presse à filer horizontale pour corps d'amortisseurs en aluminium (*Herlan*)

teurs spécialisés cherchent à augmenter cette vitesse (240 et 300 coups par minute).

Les constructeurs de ces matériels donnent généralement une caractéristique, appelée improprement « puissance de la presse », qui, en réalité, correspond sensiblement à l'effort maximal qui peut être demandé à une certaine hauteur au-dessus du point mort bas, ou sous un certain angle du vilebrequin par rapport à la verticale. Ce chiffre n'est qu'une limite, indépendante du travail qui peut être fourni par la presse. En effet, il y a lieu de ne pas oublier que l'effort que doit fournir la presse, dès le contact de la face inférieure du poinçon avec le lopin, doit être poursuivi pendant toute la durée de l'écrasement; c'est lui qui déterminera l'énergie à fournir par le volant de la presse. Certains constructeurs considèrent que, en travail à la volée, la perte de vitesse du volant à chaque coup de presse ne doit pas excéder 10 % de sa valeur nominale, ce qui correspond à 20 % de l'énergie cinétique disponible au volant. Celle-ci doit être restituée par le moteur électrique au cours de chaque cycle.

6. OUTILLAGES POUR FILAGE PAR CHOC

Les outillages comportent toujours *un ensemble standard* et *un outillage de filage* proprement dit qui se monte dans cet ensemble et qui ne comporte que les parties nécessaires à l'obtention d'un produit déterminé, c'est-à-dire un poinçon, une matrice et un extracteur en filage inverse ou un poinçon, une filière et un conteneur en filage direct.

La conception et la réalisation de ces outillages sont probablement l'un des points majeurs de la réalisation correcte d'une pièce par filage par choc. Elles sont l'apanage des spécialistes et nous ne donnerons ici que le principe de leur exécution.

6.1. Principes. — Il ne faut pas oublier qu'en filage par choc, inverse ou direct:

— Les parties mobiles de l'outillage doivent travailler dans les parties fixes avec un jeu proche de quelques centièmes de millimètre.

— Les outillages doivent résister à des pressions voisines de 100 daN/mm² exercées par le métal filé, cela en fatigue et à une température faible mais non négligeable.

6.2. Outillage de filage inverse. — L'outillage de filage proprement dit comporte un poinçon, une matrice et un extracteur, ce dernier ne posant aucun problème sauf d'ajustement.

6.2.1. Poinçon. — Il est soit monobloc, soit à tête rapportée. Au-delà de 30 mm de diamètre, il y a généralement intérêt à utiliser le poinçon dit « à tête rapportée » (fig. III-16).

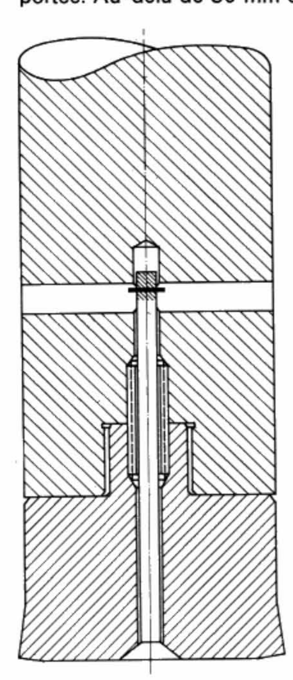


Fig. III-16

Poinçon à tête rapportée avec soupape

Les têtes de poinçon ont un profil variable selon les usages ou le type de la pièce à filer:

— Le poinçon de type français, schématisé figure III-17 comporte un chanfrein à 15° à partir d'une base dont les dimensions, en général le diamètre, représentent la fraction 8/10 de celles du poinçon. L'arête de filage *a* est souvent constituée par l'arête des deux rectifications à 90°. Un congé de 0,2 mm, réalisé à la pierre à huile, donne une arête suffisamment mouchée.

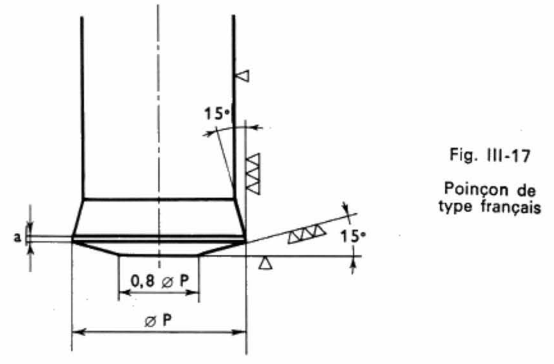


Fig. III-17

Poinçon de type français

— On rencontre également des poinçons plats sur lesquels la pente de filage de 15° n'existe pas et est remplacée par une courbe ou un congé. L'effort de filage demandé par ces poinçons est supérieur d'au moins 20 % à celui demandé par les poinçons à chanfrein.

— Le poinçon schématisé figure III-18 utilisé en Allemagne, a une arête de filage *a* qui peut aussi avoir une cote nulle. La pente de filage est constituée par une calotte dont le profil est tracé à partir de certaines tangentes comme indiqué sur la figure. Il est quelquefois dessiné avec un angle de fuite de 25°.

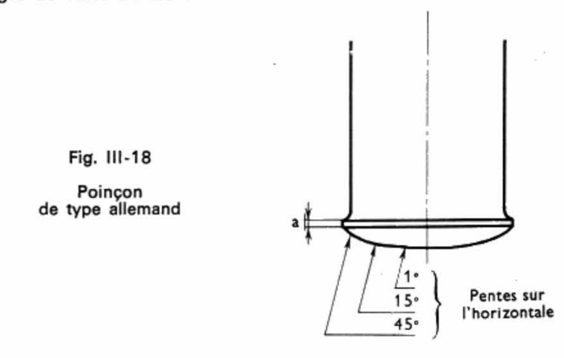
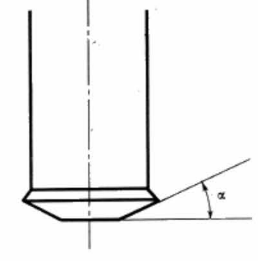


Fig. III-18

Poinçon de type allemand

— On rencontre aussi certains tracés spéciaux, dans lesquels l'angle α de la figure III-19 est compris entre 10 et 45°. L'angle habituellement choisi aux États-Unis d'Amérique est voisin de 30°, ce qui favorise particulièrement l'écoulement du métal.



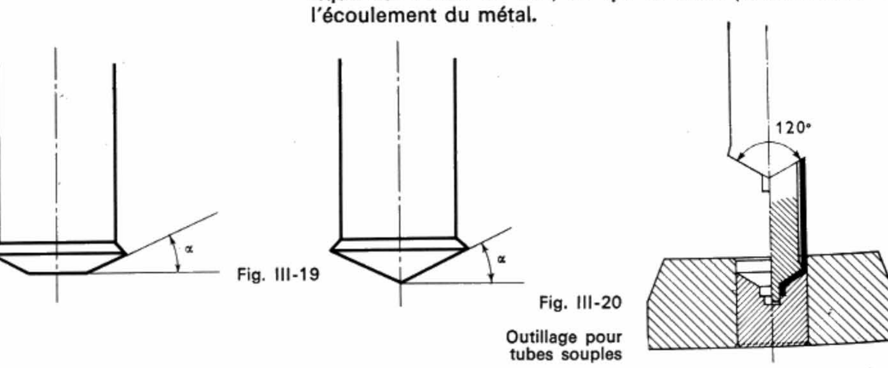


Fig. III-19

Fig. III-20

Outillage pour tubes souples

— Une pointe à 120°, telle que celle de l'extrémité des tubes souples dont la figure III-20 schématise l'outillage, diminue très nettement l'effort de filage et, par suite, permet l'obtention de pièces à parois très minces.

Remarques générales sur l'exécution des poinçons de filage inverse :

a) Le diamètre intérieur du tube filé est un peu plus faible que le diamètre de l'arête de filage du poinçon, cela en raison du retrait qui se produit lors du refroidissement de la pièce (nous avons vu précédemment que sa température peut atteindre 200° après filage). Dans le cas où la cote intérieure du produit filé doit être rigoureusement observée, il y a lieu de tenir compte de ce retrait en augmentant le diamètre du poinçon en fonction du coefficient de dilatation du métal aux températures considérées. Pour des pièces de fabrication courante, cette augmentation de diamètre est voisine de 0,05 mm pour les tubes dont le diamètre est inférieur à 25 mm et de 0,1 mm pour les tubes dont le diamètre est compris entre 25 et 100 mm. Le diamètre de la matrice doit également être supérieur à celui du tube filé de ces mêmes quantités.

b) Pour faciliter l'extraction de la pièce, qui pourrait être rendue difficile par son serrage sur le corps de poinçon, on dégage le corps de ce dernier de 0,1 à 0,4 mm par rapport à l'arête de filage.

c) Dans certains cas, l'arête de filage, qui a généralement une cote nulle pour diminuer le frottement, est constituée par une partie cylindrique pouvant atteindre 2 mm. C'est le cas des poinçons pour étuis à fond très épais qui resteraient en matrice sans cette précaution.

d) Le rapport de la longueur au diamètre du poinçon est limité par les lois du flambage. Le graphique de la figure III-21 qui traduit les lois d'Euler et de Rankine montre les élancements à ne pas dépasser en fonction de la pression de filage.

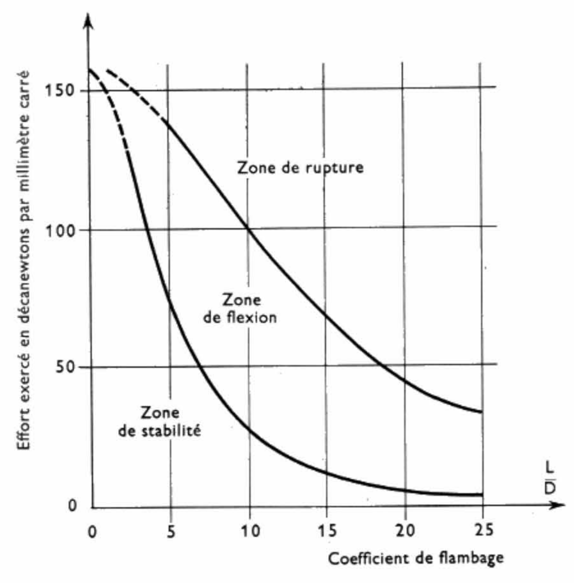


Fig. III-21 — Flambage du poinçon

e) Pour les étuis à parois minces, il faut prévoir une soupape d'entrée d'air à la tête du poinçon (V. fig. III-16).

6.2.2. Matrice. — Elle est monobloc ou en deux pièces. Les matrices monoblocs sont rarement employées car peu intéressantes au point de vue usure et surtout fragiles. Des criques se développent rapidement à la jonction du fond et des parois latérales.

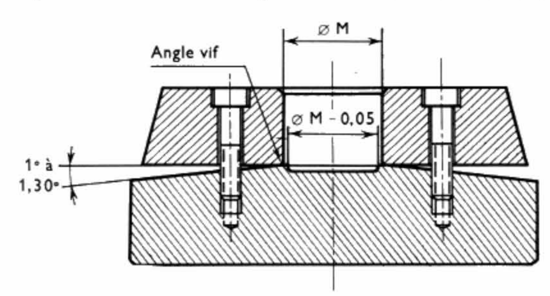


Fig. III-22 — Matrice en deux parties

La matrice en deux pièces de la figure III-22, est conçue pour que la pièce inférieure forme enclume et que la pièce supérieure joue le rôle de filière. Elles sont centrées par goupilles et maintenues soit par une boîte de bridage fixée par un moyen quelconque, soit par boulons. Dans ce type de matrice, il ne faut en aucun cas que le métal sous forte pression puisse pénétrer dans la ligne de joint. La solution mécanique est fournie par un usinage conique à 1° ou 1°5 (les Allemands vont jusqu'à 10°), qui permet le serrage sur une simple ligne de contact. On peut encore diminuer ce risque en usinant le fond de matrice à une cote inférieure de 0,05 mm à celle de l'anneau de filière : le métal, en filant, ne vient ainsi en contact avec l'anneau qu'au-dessus du point de raccordement.

La matrice à fond rapporté (fig. III-23) donne d'excellents résultats et son usinage est moins délicat : il suffit d'ajuster soigneusement, sans jeu, le fond de matrice dans l'anneau. Ce type d'outil devrait être plus largement utilisé. Le fond de matrice est muni d'un léger congé destiné à faciliter l'écoulement du métal ; contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce congé n'est pas fragile. Il a toutefois intérêt à être remplacé par un chanfrein correspondant à celui du poinçon si possible.

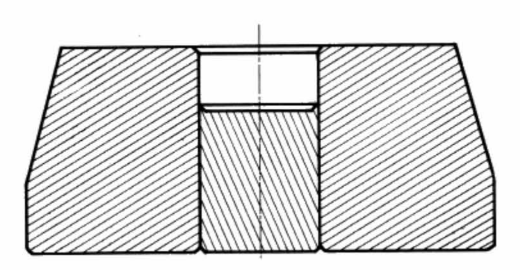


Fig. III-23 — Matrice à fond rapporté

6.3. Outillages de filage direct. — La figure III-24 représente un montage permettant le filage direct.

Le porte-matrice 1, en acier forgé, comporte un grain de choc 2 en acier trempé et rectifié sur lequel seule la matrice de filage 3 vient prendre appui. Le conteneur 4, en acier trempé également, centre la matrice par un alésage conique et se centre lui-même dans le porte-matrice 1 ou le grain 2. L'anneau 5 serre le tout sur le porte-matrice 1, par exemple, par les boulons 6, et sert en même temps de frette au conteneur 4.

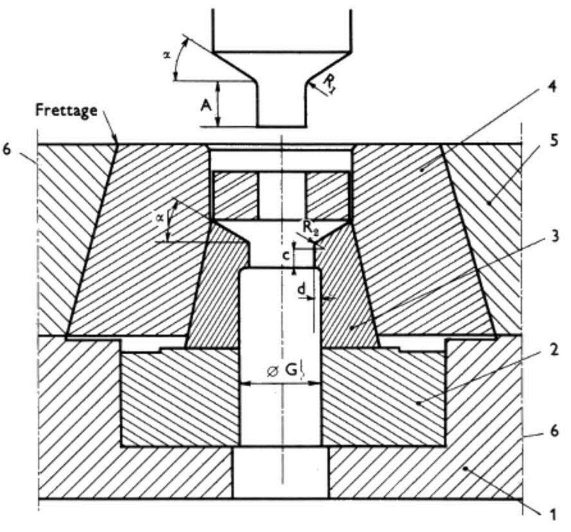


Fig. III-24 — Outillage de filage direct

Le corps de poinçon doit entrer avec le minimum de jeu (moins de 0,05 mm) dans le conteneur.

Les angles α sont égaux sur le poinçon et la matrice ; ils sont compris entre 0 et 45°, suivant les métaux. On leur

donne généralement une valeur de 30°, mais il est parfois préférable de garder un angle nul.

La hauteur A de l'aiguille doit être telle que la partie rectiligne de l'aiguille s'engage (de quelques millimètres) dans la partie rectiligne de la filière au moment où le poinçon attaque le lopin.

L'aiguille du poinçon est la partie fragile de cet outillage. Du fait du frottement intense du métal sous pression, elle est sollicitée à la traction et risque la rupture au raccordement avec le corps de poinçon. L'aiguille est considérablement renforcée si le rayon R_1 est assez grand.

Le dégagement de la filière d, ainsi que celui du grain, doit être le plus faible possible car il est néfaste à la bonne rectitude du tube filé, celui-ci ayant besoin d'être guidé à la sortie de la filière. De bons résultats ont été obtenus en prenant d égal à 0,05 mm.

Le rayon d'entrée de la filière semble n'avoir aucune influence et il est possible de filer avec une arête simplement mouchée, mais il faut que R_2 soit supérieur ou égal à R_1.

6.4. Matériaux d'outillage. — Les outils de filage par choc doivent être prévus pour résister aux grands efforts statiques provoqués par la déformation plastique du métal, aux chocs, aux frottements et aux importants échanges de chaleur qui se produisent avec la pièce. C'est pourquoi on utilise toujours des aciers spéciaux indéformables.

La composition des aciers varie, suivant les nuances, dans certaines limites :

Carbone	de	1	à	2,25 %
Manganèse	de	0,3	à	0,55 %
Silicium	de	0,1	à	0,40 %
Soufre	de	0	à	0,05 %
Phosphore	de	0	à	0,05 %
Chrome	de	11	à	13,25 %
Vanadium	de	0	à	0,15 %
Tungstène	de	0	à	1 %
Molybdène	de	0	à	0,90 %
Nickel	de	0	à	1 %
Cobalt	de	0	à	0,80 %

En réalité, les légères variations de composition de ces nuances d'acier ont moins d'influence que les variations de caractéristiques résultant d'un traitement thermique plus ou moins soigneusement exécuté.

Le corps de poinçon ne travaille pas à l'usure, mais au choc et à la compression. On choisit, de préférence, un acier au nickel-chrome ou mieux un acier au nickel-chrome-molybdène qui présente une très bonne résilience.

La tête du poinçon travaille à l'usure et il faut utiliser un acier à haute teneur en chrome ou mieux un acier au chrome-cobalt. Cette pièce doit être traitée pour obtenir une dureté Rockwell H_{RC} de 62 à 65.

La matrice monobloc doit répondre à plusieurs conditions, souvent contradictoires. Elle est en acier à haute teneur en chrome ou mieux en acier au chrome-cobalt, très résistant à l'usure et doué d'une bonne résilience. Le traitement thermique doit lui conférer une dureté d'environ 60 H_{RC}. Si le traitement normal ne donne pas satisfaction, on peut envisager la trempe étagée qui diminue la fragilité.

Dans une matrice en plusieurs parties, l'anneau travaille à l'extension (il est fretté) et le fond à la compression et au choc. L'anneau de matrice est en acier à haute teneur en chrome ou en acier au chrome-cobalt. Le fond de matrice est en acier au nickel-chrome-molybdène trempé pour obtenir une résistance de 180 daN/mm^2 et une bonne résilience.

Pour les fabrications de série, on utilise exclusivement des matrices en carbure (généralement le carbure de tungstène), qui convenablement frettées, pour éviter leur fragilité, résistent particulièrement bien à l'usure, disons dix fois plus que l'acier.

7. LES ÉBAUCHES DE FILAGE PAR CHOC

7.1. Métaux utilisés. — Dans le filage par choc, on peut utiliser tous les matériaux métalliques qui ont un bon pouvoir de déformation, c'est-à-dire qui sont ductiles et malléables. Aujourd'hui, il est possible de filer :

— Le plomb, ou mieux un alliage à 3 % d'antimoine qui est plus rigide.

— L'étain, ou mieux son alliage à 0,5-1 % de cuivre et à faible pourcentage de bismuth ou de zinc, plus rigide.

— Le zinc électrolytique titrant 99,99 % et ses alliages à 0,6 % de bismuth et à 0,20 % de plomb, 0,07 % cadmium et 0,01 % de fer. Ils sont généralement filés après préchauffage du flan à 150-180 °C.

— Les métaux précieux, surtout l'argent.

— Le magnésium et certains de ses alliages (G-A3Z1) doivent être chauffés à un minimum de 250 °C et à moins de 350 °C.

— Le cuivre électrolytique titrant 99,9 % est le plus souvent filé en direct pour réduire les efforts à mettre en jeu, donc permettre une bonne tenue des outillages. Pour des pièces faciles, il peut aussi être filé en inverse.

— Les laitons, plus durs que le métal de base, sont surtout filés en direct. L'alliage U-Z10 est quelquefois travaillé à froid, mais les laitons U-Z30 ont intérêt à être filés à chaud.

— L'aluminium est de très loin le métal de base le plus utilisé ; on le rencontre sous tous les titres : l'aluminium raffiné titrant 99,9 % se file très bien, mais son prix est trop élevé pour qu'il soit employé couramment.

L'aluminium sous-raffiné (99,8 et 99,7 %), beaucoup moins cher, se file bien. On l'a utilisé, surtout en Allemagne et en Italie, pour la fabrication de tubes souples car il demande un peu moins d'effort que l'aluminium ordinaire.

L'aluminium commercial 1050 titrant 99,5 % se file encore très bien malgré une teneur en impuretés plus grande que les précédents. Il est le plus couramment employé. L'aluminium 1200 ne titrant que 99 % se file moins bien et ne devrait être utilisé que pour les pièces faciles, notamment à forte épaisseur de paroi.

— Les alliages d'aluminium se filent d'autant moins bien que leur dureté Brinell est plus grande, l'épaisseur des parois doit alors être assez forte et la hauteur de l'objet limitée. On peut envisager des pièces filées en 3003, 5005, 5754 A, 6181 A, 2017 A, 7049 A et même en certains alliages de fonderie. Certains préchauffent les alliages de grande dureté à 250 °C, notamment le 2017 A.

— Depuis les premières expériences de Liebergeld, les ingénieurs de la Manufacture métallurgique Neumayer à Nuremberg ont mis au point le filage à froid de l'acier. Les nuances utilisées aujourd'hui sont nombreuses : fer pur, acier extra-doux à 0,1 % de carbone, acier mi-doux à 0,2 % de carbone, acier mi-dur Martin calmé au silicium ou à l'aluminium à 0,4 % de carbone, etc. Pour ces aciers non alliés, la difficulté du filage augmente avec la teneur en carbone, elle-même proportionnelle à la résistance mécanique de l'acier. Donc, la déformation totale que l'on peut faire subir au lopin, sans recuit intermédiaire, diminue quand la teneur en carbone augmente. Or, l'écrouissage, et donc la résistance du métal, croissent avec le taux de déformation : il peut être souhaitable d'utiliser au départ un acier à faible teneur en carbone, peu résistant, mais très malléable, pouvant subir un fort taux de déformation afin d'obtenir une pièce finie résistante, étant en acier très écroui.

Il est également possible de filer à froid certains aciers alliés, par exemple : acier au chrome (C = 0,20 %, Mn = 0,4 à 0,7 %, Cr = 0,30 à 0,90 %), aciers au nickel-chrome (C = 0,15 %, Mn = 0,5 %, Cr = 0,20 %, Ni = jusqu'à 2 %) et même au nickel-chrome-molybdène.

On peut aussi filer par choc, dans des conditions opératoires spéciales et à des températures bien déterminées, des métaux spéciaux : titane, zirconium et même béryllium.

Si l'on part d'un lopin en bi-métal ou tri-métal, l'étui obtenu est plaqué intérieurement ou extérieurement à peu près au même pourcentage. On a ainsi filé par choc : du fer pur plaqué cuivre, nickel ou aluminium, de l'aluminium plaqué cuivre, un alliage d'aluminium plaqué aluminium pur et surtout du plomb plaqué étain pour les tubes souples.

7.2. Exigences générales. — Les ébauches sont appelées également pions, flans ou lopins. Leur volume est égal à celui de la pièce brute à obtenir. Leur forme extérieure est, sauf rares exceptions, celle du conteneur ou de la matrice, au jeu minimal près, permettant une introduction facile, soit 0,3 mm environ.

Une importance particulière doit être attachée aux tolérances d'épaisseur (donc de volume), tout au moins en ce qui concerne le minimum acceptable. En effet, la dispersion sur la hauteur des étuis est définie, à très peu de chose près, par le produit de l'écart entre le maximum et le minimum d'épaisseur par le rapport de filage $\frac{S}{s}$ qui peut atteindre 100. On peut aboutir ainsi à des écarts de hauteur proches de 10 à 20 mm pour les pièces minces ; cela est susceptible d'entraîner soit leur rebut par manque de hauteur, soit leur déformation par l'extracteur.

L'usure des outillages pouvant occasionner des ennuis du même ordre, on y remédie chaque fois que cela est possible, c'est-à-dire dans la limite des tolérances accordées, en utilisant des matrices neuves avec les poinçons usagés et les poinçons neufs avec des matrices usagées. Une correction peut être apportée aux variations de hauteur dues à l'usure des outillages en agissant très faiblement sur l'épaisseur du fond dans la limite des tolérances.

Une autre différence dans la hauteur des produits filés, se rattachant à la nature du lopin, peut provenir de différences dans la dureté des pions de même nature. La précaution indispensable consiste en un recuit de tous les pions avant filage afin de réduire les écarts de dureté. Ce recuit est, en principe, effectué en usine par le fournisseur livrant le métal sous forme de pions.

7.3. Préparation du lopin. — Les lopins peuvent être obtenus techniquement par différentes méthodes :

7.3.1. Par découpage dans la tôle. — Les parois du produit filé sont constituées, pour une large part, par la paroi latérale du lopin, d'où la nécessité d'obtenir un découpage lisse si l'on désire des produits de bonne présentation. Or, il est connu que les parois latérales des flans découpés présentent des arrachements dont l'ampleur varie avec le jeu de découpage et croît avec l'épaisseur de la tôle d'origine.

Une méthode simple, pour obtenir des flans à parois très lisses, consiste à les découper dans une matrice dont l'arête est constituée par un rayon de l'ordre du quart au sixième de l'épaisseur du métal à découper. Le jeu entre poinçon et matrice doit alors être nul (fig. III-25). Dans certains cas, on peut également donner une coupe au poinçon.

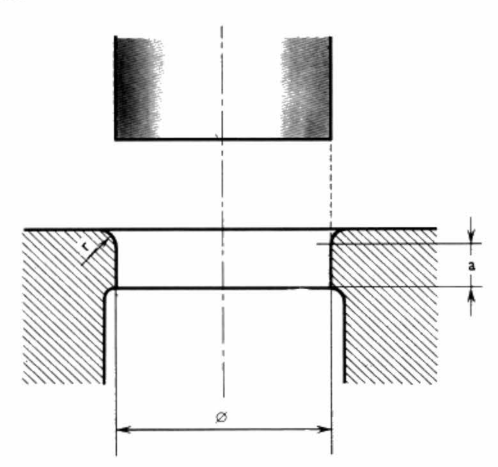


Fig. III-25 — Outil de découpage des pions

Lorsque l'ébauche est constituée par un anneau et que l'alésage doit être soigné, on utilise la méthode inverse en rectifiant l'arête de découpage du poinçon au rayon correspondant à celui qui aurait été réalisé sur la matrice. L'utilisation d'un outillage tel que celui représenté figure III-26, dont le poinçon mesure quelques centièmes de millimètre de plus que la matrice, elle-même chanfreinée à 45°, donne des résultats voisins de ceux précédemment indiqués.

Dans les deux cas, il y a en fait *repassage* de la pièce découpée.

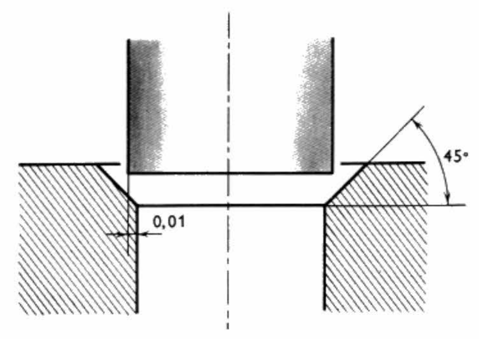


Fig. III-26 — Outil de découpage des pions

7.3.2. Par tronçonnage dans la barre. — Les ébauches de filage peuvent être également obtenues par tronçonnage d'une barre, à l'outil, à la fraise-scie ou à l'aide d'une machine spéciale.

Le choix entre le découpage dans la tôle et le tronçonnage ne peut être déterminé que par une étude complète du prix de revient, tenant compte du prix de reprise des chutes, différent dans les deux cas, et de la main-d'œuvre. Certains pensent que le tronçonnage devient intéressant lorsque la hauteur du pion est au moins égale à 1,5 fois le diamètre. Il semble que ce chiffre soit trop élevé et que le tronçonnage dans la barre peut être envisagé dès que les épaisseurs de flan atteignent 15 à 20 mm.

7.4. Recuit des lopins. — Après découpage dans la tôle notamment, le contour du lopin est partiellement écroui. Afin d'éviter la différence de dureté qui en résulte, on procède toujours à un recuit de recristallisation des lopins avant filage. De plus, puisque ce traitement thermique est nécessaire, on a un double intérêt à choisir le métal de base dans un état partiellement écroui, quart-dur ou demi-dur, afin de faciliter le découpage ou le tronçonnage et d'éviter le grain grossier de recristallisation de la partie du pion très faiblement écrouie par cette opération.

Après ce recuit, le grain doit être fin et surtout homogène. La finesse de grain recommandée est la suivante :

Métal	Dimensions des grains (millimètres)	Nombre de grains par millimètre carré	Dureté Brinell
Plomb	jusqu'à 2		
Zinc	0,05 à 0,16	500-50	35 à 40
Aluminium	0,05 à 0,16	500-50	19 à 22
Alliages d'aluminium	0,05 à 0,16	500-50	25 à 70
Cuivre	0,03 à 0,10	1 400-100	40 à 50
Laitons	0,05 à 0,10	500-100	60 à 70
Acier à faible teneur en carbone	0,02 à 0,04	3 300-800	80 à 120

Rappelons les températures de recuit des principaux métaux utilisés en filage par choc :

Aluminium raffiné à 99,9 % . . . . 300 °C
Aluminium 1050 et alliages . . . . 400 °C
Cuivre . . . . 650 °C
Laitons . . . . 750 °C
Plomb et étain . . . . pas de traitement
Argent et or . . . . 650 °C
Zinc . . . . 200 °C
Aciers . . . . 750 °C

7.5. Lubrification des lopins. — Une des conditions nécessaires pour obtenir un filage correct est une bonne lubrification du lopin, de façon à obtenir le glissement du métal filé sur l'outillage. Les choix du lubrifiant approprié et du mode d'application nécessitent souvent des essais préliminaires, car les exigences demandées sont très sévères et très diverses.

Pour le plomb et surtout l'étain, on peut employer un mélange de vaseline et d'amidon ou bien de paraffine en poudre et d'huile légère, par exemple, de l'huile d'olive. Pour le zinc, de la vaseline ou un mélange de talc et d'huile épaisse conviennent. Pour l'aluminium et ses alliages, de nombreux lubrifiants sont utilisés. Citons plus particulièrement la lanoline pure ou mélangée à 25 ou 30 % de cire d'abeille dissoute dans un solvant à évaporer comme le white-spirit ou le trichloréthylène, le savon en poudre, et surtout le stéarate de zinc en poudre, de très loin le plus employé. Depuis quelques années, des formules commerciales de lubrifiants font leur apparition et semblent à tout point de vue préférables au stéarate de zinc. Le cuivre peut être filé, ainsi que ses alliages avec les mêmes lubrifiants que l'aluminium. Pour le magnésium, on peut utiliser du graphite colloïdal. Pour tous les métaux non ferreux, on aurait intérêt à décaper les lopins avant la lubrification mais, en fait, aucun traitement n'est nécessaire.

Les lubrifiants doivent être étendus en une couche mince et régulière sans présence de corps étrangers. Le lubrifiant s'applique le plus souvent par passage au tonneau.

Pour les lubrifiants dissous dans un solvant, l'application se fait au trempé, mais l'évaporation du solvant doit être complète avant l'opération de filage. D'ailleurs, afin de répartir le lubrifiant ainsi déposé en une couche d'égale épaisseur, et notamment de supprimer la goutte de lubrifiant inévitable pendant le séchage, il est recommandé de passer les pions au tonneau pendant une minute.

Pour le filage à froid de l'acier, il faut, en plus du lubrifiant, un traitement superficiel de l'ébauche qui forme support pour le lubrifiant et couche de séparation entre le matériau qui file et l'acier de l'outillage. Cela est obtenu en appliquant sur toute la surface du lopin une couche métallique ou une couche de sels métalliques minéraux. En pratique, les meilleurs résultats sont obtenus par phosphatage des lopins au phosphate de zinc plutôt qu'aux phosphates de manganèse, calcium, cadmium ou baryum. Le cycle de préparation des lopins d'acier comporte alors un dégraissage, un décapage (acide chlorhydrique froid ou sulfurique chaud), des rinçages à l'eau courante froide puis chaude, un phosphatage simple ou double, des rinçages à l'eau courante froide puis chaude, une lubrification et un séchage. Comme nature de lubrifiant, on peut recommander l'huile de colza et le talc, c'est-à-dire des produits à acides gras dont on peut encore augmenter l'activité au moyen de composés sulfurés, l'huile de palme et le savon en solution aqueuse (c'est le lubrifiant le plus utilisé).

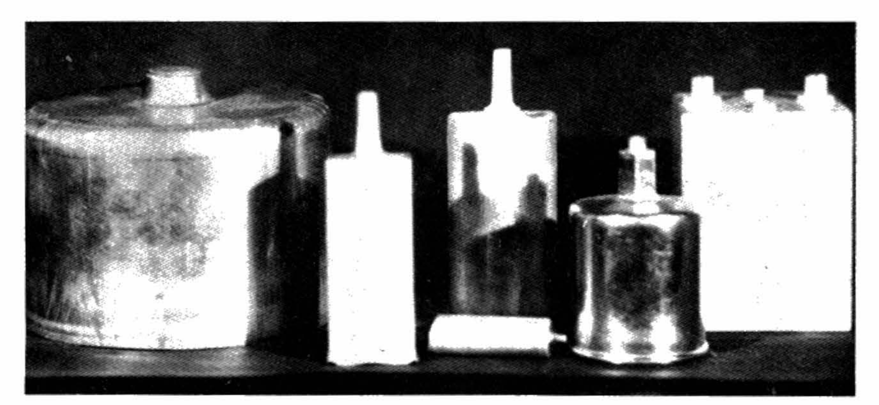


Fig. III-27

Pièces filées avec bossages symétriques

8. POSSIBILITÉS DU FILAGE PAR CHOC

8.1. Possibilités dimensionnelles. — Toutes choses égales par ailleurs, les difficultés d'obtention d'une pièce déterminée sont d'autant plus grandes que l'effort spécifique nécessaire au filage est plus intense.

Ainsi les possibilités sont plus grandes pour le plomb et l'étain que pour l'aluminium ; pour ce dernier métal elles sont meilleures que pour le cuivre et, a fortiori, que pour l'acier.

En valeur absolue, les plus gros diamètres atteignent 150 mm pour les métaux très malléables ; il n'y a pas de limite inférieure.

L'épaisseur minimale des parois dépend notamment du diamètre de l'objet et de la nature du métal (voir les tableaux donnés au paragraphe 4).

Exemples : Étui en aluminium de diamètre 25 mm et d'épaisseur de paroi 0,08 mm ; tube en plomb plaqué étain de diamètre 20 mm et d'épaisseur de paroi 0,06 mm. Il n'y a pas de limite supérieure à cette épaisseur des parois.

8.2. Tolérances. — La technique du filage par choc permet d'obtenir des pièces avec des tolérances très réduites. Toutefois, en raison, d'une part des difficultés de centrage de l'outil et de la flexibilité du poinçon et, d'autre part, de la température prise par le métal pendant le filage, plus les tolérances sur les diamètres et sur les épaisseurs de paroi sont larges, plus elles permettent un usage étendu des outillages avant usure.

Les différents auteurs ne sont pas tout à fait d'accord en ce qui concerne les tolérances minimales qu'il est possible de réaliser avec différents métaux compte non tenu de l'usure des outils. Pour l'aluminium, Sachs pense que pour une épaisseur de paroi très mince la tolérance serait de $\pm$ 40 % et il donne une tolérance type $\pm$ 0,025 à $\pm$ 0,050 mm. Mass donne une tolérance sur l'épaisseur de paroi de 0,05 à 0,30 mm pour des diamètres de 10 à 100 mm. Hornauer prétend, probablement à juste raison que la tolérance minimale sur l'épaisseur de paroi, tant en filage direct qu'en filage inverse, doit être de $\pm$ 5 à $\pm$ 10 % de l'épaisseur. Les normes allemandes V.D.I. donnent les tolérances du tableau III ci-après, suivant le procédé de filage, le diamètre de la pièce et la nature du métal.

8.3. Possibilités de formes. — Les pièces circulaires filées par choc sont les plus faciles à réaliser en raison de leur symétrie de rotation : l'écoulement du métal, à partir du centre du lopin, est identique dans toutes les directions. Ce sont de loin les plus nombreuses.

8.3.1. Pièces à fond matricé. — Il suffit de munir la matrice de filage inverse d'une gravure pour en obtenir sa reproduction sur le fond de la pièce. Toutefois, cette gravure ne peut pas être quelconque et une certaine symétrie par rapport à l'axe est nécessaire. À noter que, pour la même raison, une inscription de lettres en relief sur le fond d'un étui n'est jamais très nette.

La figure III-27 montre plusieurs pièces parfaitement venues en aluminium, et qui sont munies de bossages ou de fonds en forme, à peu près symétriques par rapport à l'axe.

8.3.2. Pièces de forme. — On a essayé le filage de pièces présentant des plans de symétrie rectangulaires, le carré d'abord, puis le rectangle et les sections qui s'y rattachent (ellipse, rectangle à larges courbes, ovales, etc.) Pour des pièces dont l'épaisseur de paroi est assez importante, disons, pour fixer les idées, supérieures à 0,5 ou 0,8 mm, le filage d'un flan en aluminium se fait sans trop de difficultés quel que soit le rayon d'angle.

À noter que, pour une pièce présentant en section la forme d'un rectangle allongé, la hauteur de l'étui au droit de la longueur du rectangle sera plus haute qu'au droit de

TABLEAU III

	Métal	Diamètre du poinçon (millimètres)	Tolérances (millimètres) sur le diamètre extérieur	sur l'épaisseur de paroi	sur l'épaisseur du fond
Filage inverse	Métaux non ferreux (plomb, étain, zinc, aluminium)	0 à 10	0,08	0,03	0,06
		10 à 20	0,10	0,04	0,08
		20 à 40	0,15	0,05	0,10
		40 à 60	0,18	0,06	0,12
		60 à 80	0,20	0,06	0,15
		80 à 100	0,30	0,07	0,20
		100 à 120	0,35	0,10	0,30
	Aciers	20 à 40	0,12	0,15	0,20
		40 à 60	0,15	0,20	0,20
		60 à 80	0,20	0,25	0,25

	Métal	Diamètre du conteneur	Tolérances (millimètres) sur le diamètre extérieur	sur l'épaisseur de paroi
Filage direct	Plomb, étain, aluminium et alliages d'aluminium	10 à 20	0,10	0,04
		20 à 40	0,15	0,08
		40 à 80	0,20	0,12
		$>$ 80	0,30	0,15
	Laiton U-Z28 à U-Z37	10 à 20	0,15	0,10
		20 à 40	0,15	0,15
		40 à 80	0,20	0,15
	Acier Martin à moins de 0,2 % de carbone Acier Thomas à moins de 0,1 % de carbone	$>$ 80	0,25	0,15

a largeur, celle-ci étant plus éloignée que la première du « *point d'éclatement* ». Il faut tenir compte de ce phénomène dans le calcul du volume du pion en prévoyant une hauteur de rognage supérieure à celle des filés cylindriques.

Dans les pièces à un seul axe de symétrie, il faut également, et plus que pour un rectangle, agir sur les épaisseurs de paroi pour obtenir un filage uniforme.

9. APPLICATIONS

L'on prétend souvent que le filage par choc doit être envisagé du point de vue économique quand la hauteur du produit cylindrique dépasse une fois et demie à deux fois le diamètre. En fait, le calcul doit être fait dans chaque cas, car le résultat dépend pour beaucoup des moyens disponibles. Ce calcul est d'ailleurs assez complexe, car il faut tenir compte d'éléments difficilement chiffrables. En effet, par rapport à l'emboutissage, le nombre de coups de presse est réduit, mais, du fait de sa capacité, la presse de filage est plus coûteuse que la presse à emboutir. De plus le nombre de passes, donc le coût des outillages, est réduit, mais la durée de vie des outils de filage n'est pas indéfinie (de 200 000 à 1 000 000 de pièces). Par ailleurs les opérations de reprise : bord tombé en collerette, rognage des objets rectangulaires, sont souvent plus onéreuses que pour les pièces embouties. En dernier lieu le filage par choc d'objets à parois minces, seul capable de réduire le poids matière, ne s'applique qu'aux métaux très malléables, et pratiquement, en fait, qu'à l'aluminium.

En revanche, pour des objets bien adaptés au filage par choc, le prix de revient est extrêmement bas, de très loin inférieur à celui permis par d'autres techniques de mise en forme.

Les principales applications du filage par choc se rencontrent dans le domaine de l'emballage et surtout avec aluminium.

9.1. Tubes souples. — Ils ont été utilisés d'abord pour l'emballage des dentifrices. Ils servent aujourd'hui pour une très grande variété de produits, même alimentaires (moutarde, lait ; fig. III-28). Techniquement, les tubes souples sont filés en inverse avec une épaisseur de paroi de 0,09 à 0,15 mm suivant les tailles ; le métal est quelquefois du plomb plaqué d'étain, mais le plus souvent c'est de l'aluminium (son titre est passé de 99,8 à 99,5 % avec les perfectionnements de la technologie). Après filage, les tubes sont rognés et le nez fileté sur une mouleureuse automatique, puis ils sont recuits afin de rendre à l'aluminium toute sa plasticité (nécessaire à l'utilisation) avant de passer aux finitions : dégraissage, éventuellement vernissage intérieur,

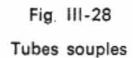
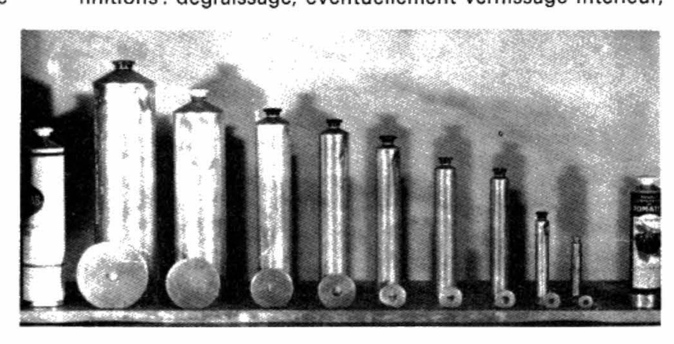
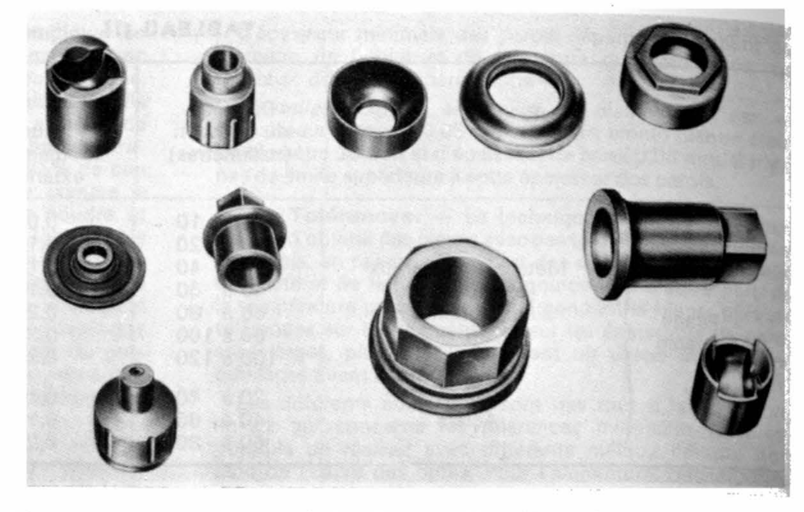


Fig. III-28

Tubes souples





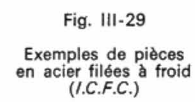


Fig. III-29

Exemples de pièces en acier filées à froid (*I.C.F.C.*)

puis impression en plusieurs couleurs sur machine automatique.

Les deux perfectionnements techniques récents en matière de tubes souples consistent l'un dans la mise au point d'un tube muni d'un opercule sous le bouchon et l'autre dans la possibilité de rendre les tubes légèrement coniques de façon à ce qu'ils s'emboîtent les uns dans les autres, ce qui diminue considérablement les frais de transport.

9.2. Étuis rigides. — La première utilisatrice de ces étuis a été l'industrie pharmaceutique avec, notamment, le tube de comprimés d'aspirine. Les industries alimentaires ont également employé ces étuis (lait en poudre, eaux minérales). Techniquement, ces étuis ou boîtes, sont filés en inverse avec une épaisseur de paroi voisine de 0,25 à 0,40 mm ; ils ne sont pas recuits de façon à conserver leur rigidité et ils sont terminés également automatiquement par l'impression. Ces objets sont surtout en aluminium à 99,5 %.

9.3. Bombes aérosols. — Ce type d'emballage, qui a vu le jour en Europe il y a une quinzaine d'années, s'est développé considérablement. Il est utilisé pour des insecticides, des produits capillaires, des peintures et vernis, et même des produits alimentaires (crème Chantilly).

Du point de vue technique, les bombes aérosols sont soit monoblocs, c'est-à-dire filées en inverse avec leur fond, le col étant ensuite rétreint sur machine automatique ; soit en deux pièces, c'est-à-dire filées en inverse avec leur col dans la matrice et fermées par sertissage d'un fond. Actuellement, les cadences des machines automatiques sont telles que l'aérosol deux pièces revient un peu moins cher que la bombe monobloc. Un perfectionnement technologique récent en matière d'aérosols est la mise au point d'une bombe dans laquelle le propulseur est isolé de la matière conditionnée.

9.4. Pièces diverses. — En dehors de l'application à l'emballage, un certain nombre d'applications du filage par choc, anciennes ou récentes, doivent être citées :

— Les pompes à bicyclette dont le fond n'est pas serti, (elles sont obtenues par filage direct).

— Les capuchons et corps de stylos, les corps d'extincteur, les tubes d'amortisseurs, des manches pour pinceaux ou pour brosses, les torches électriques, les bouteilles thermos, les siphons pour eau de Seltz, des éléments de filtres à air ou à huile, des enveloppes de briquets, les boîtiers de condensateurs, les tubes de piles sèches en zinc, etc.

— Dans le domaine des pièces en acier, pour lesquelles les épaisseurs de paroi ou les sections filées restent plus fortes que pour les pièces en métaux non ferreux, on peut citer les boulons, les obus, des moyeux, des douilles, différentes pièces mécaniques obtenues autrefois par forgeage à chaud ou par décolletage, etc. (fig. III-29).

10. CONCLUSION

La technique du filage par choc, parfaitement au point, n'est en fait devenue industrielle que dans l'emballage. Ses nombreux avantages devraient cependant entraîner son utilisation dans d'autres domaines. Évidemment cela impose que les projeteurs des bureaux d'études connaissent bien cette méthode de mise en forme du métal et, de ce fait, puissent concevoir des pièces, très économiques, aisément réalisables en filage par choc.

CHAPITRE IV
REPOUSSAGE

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Principe succinct. — Le repoussage au tour est un procédé qui permet d'obtenir des pièces creuses en partant d'un disque découpé dans un métal en feuille. Ce disque est déformé sur un tour afin de lui faire prendre le profil et les dimensions d'un outillage qui tourne et qu'on appelle un *mandrin* (fig. IV-1).

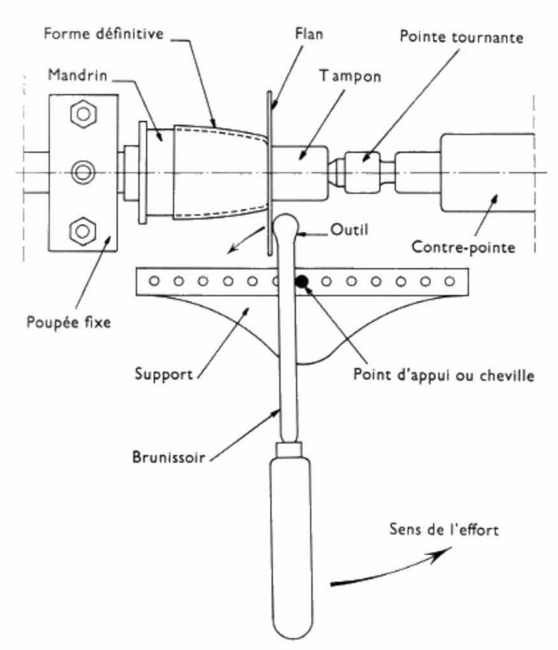


Fig. IV-1 — Schéma de principe du repoussage au tour

1.2. Historique et évolution. — Il semble que l'origine en remonte au Xe siècle en Chine. Il est à noter qu'un tour à repousser a été rapporté par Napoléon après la campagne de Russie; il se trouve actuellement au musée des Arts et Métiers à Paris. On retrouve la trace de tours à repousser vers 1840 en Grande-Bretagne et aux États-Unis d'Amérique. Avant l'apparition de l'électricité, les tours étaient actionnés par pédale ou par manivelle. Jusqu'à la guerre de 1914-1918 on note peu d'applications industrielles, le repoussage étant surtout utilisé pour l'orfèvrerie, les ornements d'église et les vases décoratifs. C'est à cette époque qu'il commençe à être appliqué à la production de pièces d'aéronautique et d'armement, et, après l'armistice, à la fabrication d'articles de ménage et de produits d'assez grande consommation, notamment les réflecteurs et projecteurs pour l'éclairage. Après la guerre de 1939-1945, et grâce en particulier à l'expérience acquise par les techniciens allemands pendant le conflit, on assiste à une mécanisation du repoussage à base d'hydraulique, aboutissant entre autres, au fluotournage que nous verrons en fin de chapitre. Les procédés traditionnels et élémentaires sont toujours utilisés et valables.

1.3. Intérêt et possibilités du procédé élémentaire. — Le matériel est relativement simple et peu coûteux :

a) Tours à repousser dont le prix est peu élevé.
b) Outils manuels dont l'usure est peu rapide.
c) Mandrins et centres en bois faciles à tailler (principalement orme, noyer ou buis) ou en acier; leur coût est assez modique. On utilise également les alliages légers et les bois comprimés et plastifiés.

Une main-d'œuvre qualifiée est nécessaire. Cette technique exige une certaine force physique, des connaissances en dessin industriel et une habileté difficile à acquérir.

Le repoussage est intéressant pour de nombreuses fabrications:

a) prototypes ou pièces uniques de révolution ne justifiant pas la réalisation d'un outillage coûteux (les possibilités en diamètre vont jusqu'à 3 000 mm) ;
b) petites séries (pour les mêmes raisons) ;
c) pièces dont la forme est irréalisable par emboutissage, quelle que soit l'importance de la série;

Le repoussage est également intéressant chaque fois que la différence de matière employée entre le repoussage et l'emboutissage ne compense pas l'économie réalisée sur la main-d'œuvre par la mécanisation (surtout dans le cas de métaux nobles).

Exemple simple : Pour réaliser un récipient cylindrique en aluminium de 130 mm de diamètre et de 150 mm de hauteur, il faut employer un disque de 320 mm de diamètre en emboutissage et de 240 mm de diamètre en repoussage (du fait de l'allongement et de l'amincissement). Bien que deux passes d'embouti soient suffisantes, alors qu'un ouvrier repousseur ne produira que 30 pièces à l'heure, la différence de masse de matière rend l'exécution par repoussage plus avantageuse. Le diagramme ci-dessous donne une idée de la rentabilité comparée des deux techniques, mais ne tient pas compte des différences de matière dont nous avons parlé ci-dessus (fig. IV-2).

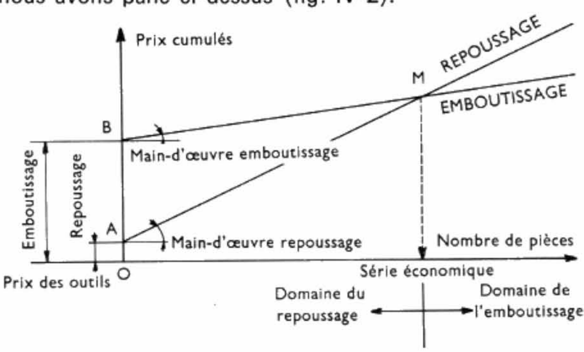


Fig. IV-2 — Diagramme de rentabilité du repoussage (*La Machine-outil française*)

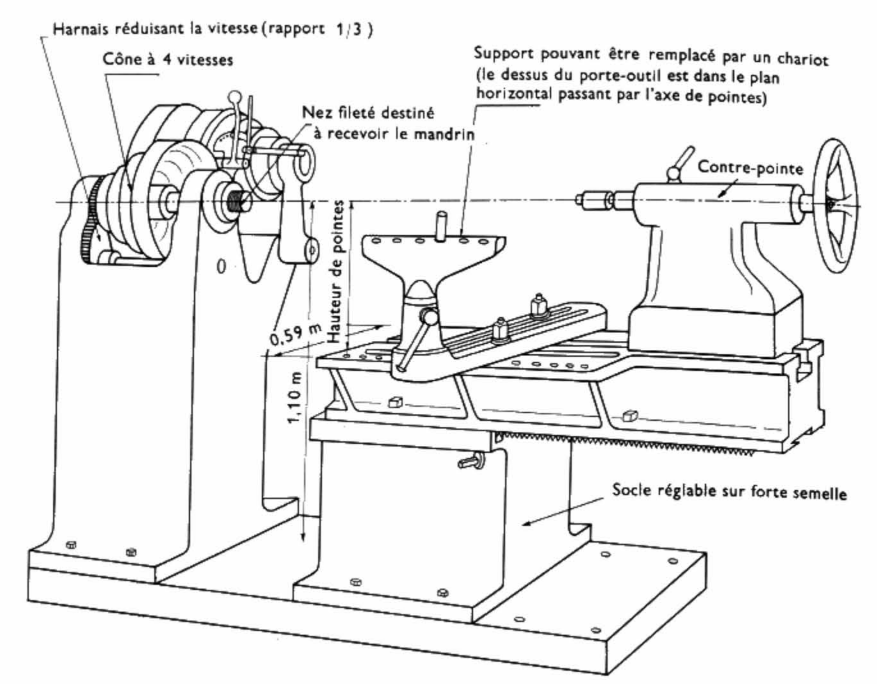


Fig. IV-3

Tour à repousser à banc rompu pour flans de 2 m de diamètre (*Aluminium français*)

2. MATÉRIEL

2.1. Tours. — La figure IV-3 schématise un tour à banc rompu pour le repoussage de flans de 2 m. Le banc est en fonte et supporte la poupée fixe dont la broche est munie d'un cône étagé pour trois, quatre ou cinq vitesses, variables de 400 à 2 400 tr/mn.

La broche doit supporter des efforts axiaux et radiaux importants et est montée sur paliers à billes avec butée. Son extrémité est filetée mâle pour recevoir les mandrins. La poupée mobile, ou contre-pointe, doit pouvoir se déplacer facilement et rapidement, des déplacements d'une grande amplitude étant nécessaires pour éjecter aisément les pièces repoussées. Il est préférable qu'elle porte un arbre commandé par levier pour faire des serrages rapides sur une rampe hélicoïdale plutôt qu'un volant à vis; d'autres dispositifs, comme le serrage hydraulique, donnent le même résultat. L'extrémité de l'arbre de la poupée mobile est munie d'une pointe tournante, montée sur butée à billes ou roulements à rouleaux coniques; elle sert de support aux centres. Le support des outils est monté sur des glissières disposées transversalement par rapport au banc. Il peut être déplacé rapidement dans le sens longitudinal et dans le sens transversal; il est orientable et réglable en hauteur. Ce support est un support simple d'outils à main comme indiqué sur la figure IV-3.

Les tours de modèle courant ont 250 à 350 mm de hauteur de pointe. Les modèles à banc rompu permettent le repoussage de flans de 2 m de diamètre. On utilise aussi des tours à boîtes de vitesses, des tours à chariots hydrauliques avec, en variante, le serrage hydraulique de la contre-pointe, etc.

2.2. Outils

2.2.1. Non tournants. — On utilise des outils en acier trempé et poli; ils sont équipés de manches courts pour le travail dit « à la poitrine » ou de manches longs pour le travail dit « sous le bras » (fig. IV-4).

Pour le travail des métaux minces, l'ouvrier tient dans sa main gauche un morceau de bois (généralement du cornouiller) appelé *cale* ou *outil à soutenir ;* il sert à éviter la formation des plis.

2.2.2. Outils tournants ou molettes. — Utilisés plus particulièrement pour le travail des métaux ferreux, ils peuvent être de profils très variés : ronds, à angles, symétriques

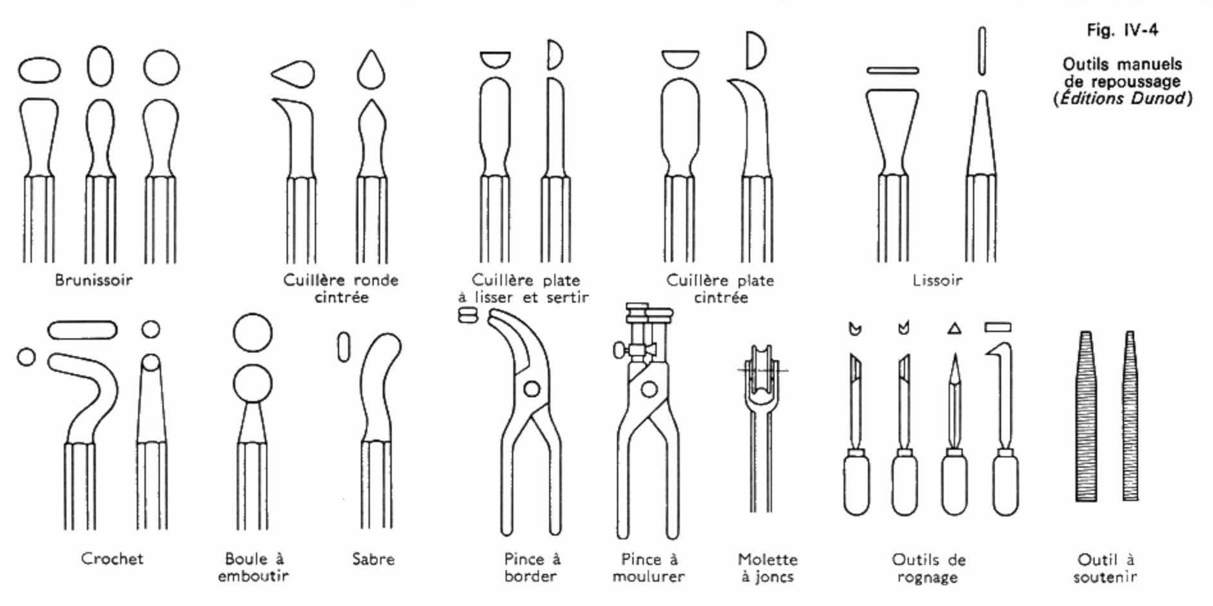
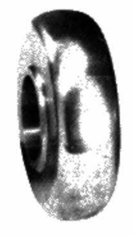
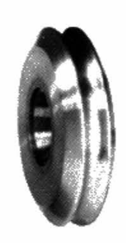


Fig. IV-4

Outils manuels de repoussage (*Éditions Dunod*)



Molette demi-ronde — Molette bombée — Molette à angler — Molette à jonc

Fig. IV-5 — Formes de molettes de repoussage (*Rondolotti*)

ou asymétriques (fig. IV-5). Ils sont montés sur des porte-molettes emmanchés, et maniés comme des outils fixes.

2.3. Mécanisation élémentaire. — Depuis fort longtemps il a été imaginé deux procédés principaux permettant de repousser des pièces épaisses avec une fatigue moindre (on considère que l'épaisseur maximale pour le travail purement manuel se situe vers 10/10 soit 1 mm pour la tôle d'acier, 15 à 20/10 pour le laiton, et 30/10 pour l'aluminium).

2.3.1. Brancards. — Un brancard est composé d'un té de support tournant, articulé et réglable, sur lequel s'emboîte une molette munie d'un pivot. Il est actionné manuellement à l'aide de deux grands bras de levier. Il est plus particulièrement utilisé pour le repoussage de pièces coniques ou pour des passes préparatoires (fig. IV-6).

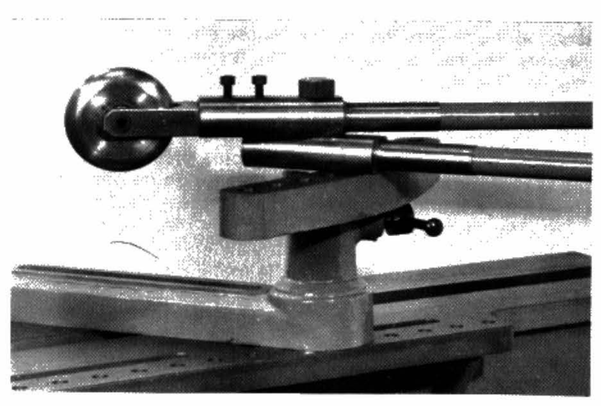


Fig. IV-6 — Outil-ciseau dit brancard (*Rondolotti*)

2.3.2. Chariots. — Ce sont des appareils inspirés des chariots des tours de mécanique mais orientables dans toutes les directions. Deux vis mères font mouvoir une tourelle longitudinalement et transversalement. Ces deux vis mères sont actionnées par deux manivelles, l'ouvrier en tenant une dans chaque main. Sur la tourelle est fixée une molette de forme appropriée au travail à exécuter (fig. IV-7).

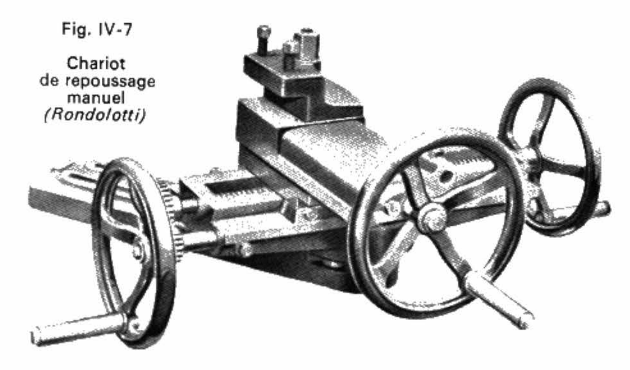


Fig. IV-7

Chariot de repoussage manuel (*Rondolotti*)

2.3.3. Rognage. — Pour obtenir une coupe propre et une hauteur ou un diamètre déterminés, on est amené à rogner les pièces repoussées. Cette opération s'effectue, soit à la main pendant le repoussage, avec des outils tranchants (V. fig. IV-4), soit à l'aide d'un chariot de robinetier, en reprise, chariot adaptable sur le tour à repousser (fig. IV-8).

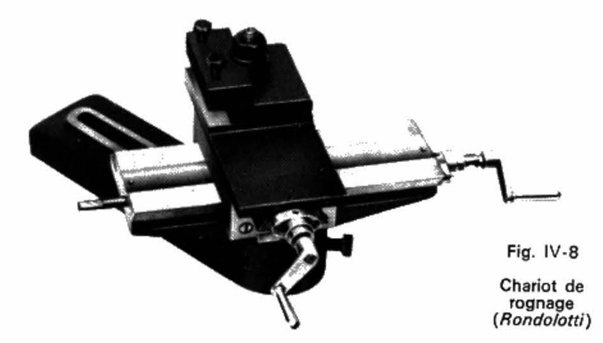


Fig. IV-8

Chariot de rognage (*Rondolotti*)

2.3.4. Autres accessoires. — Pour le travail en série on utilise des centreurs réglables qui évitent le centrage à l'aide d'une cale, et placent automatiquement le disque concentriquement au mandrin et au centre (fig. IV-9).

On se sert également de rogneurs fixes, montés sur le banc du tour. On les dispose de manière à ce que l'outil qu'ils portent soit au contact de la partie supérieure du mandrin et arase la pièce en fin de repoussage (fig. IV-10).

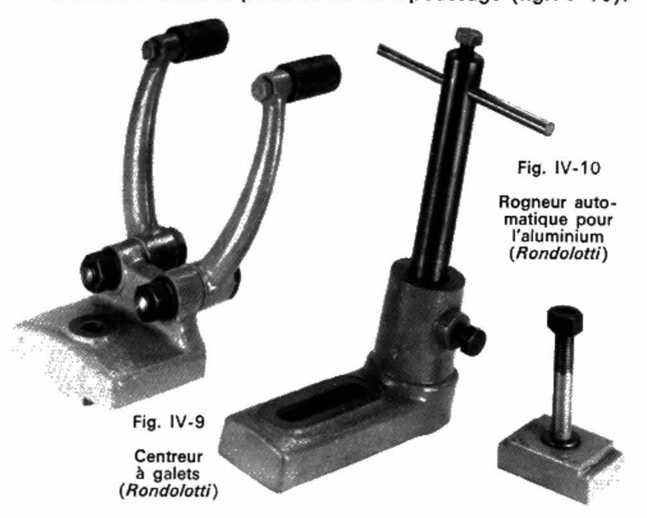


Fig. IV-10

Rogneur automatique pour l'aluminium (*Rondolotti*)

Fig. IV-9

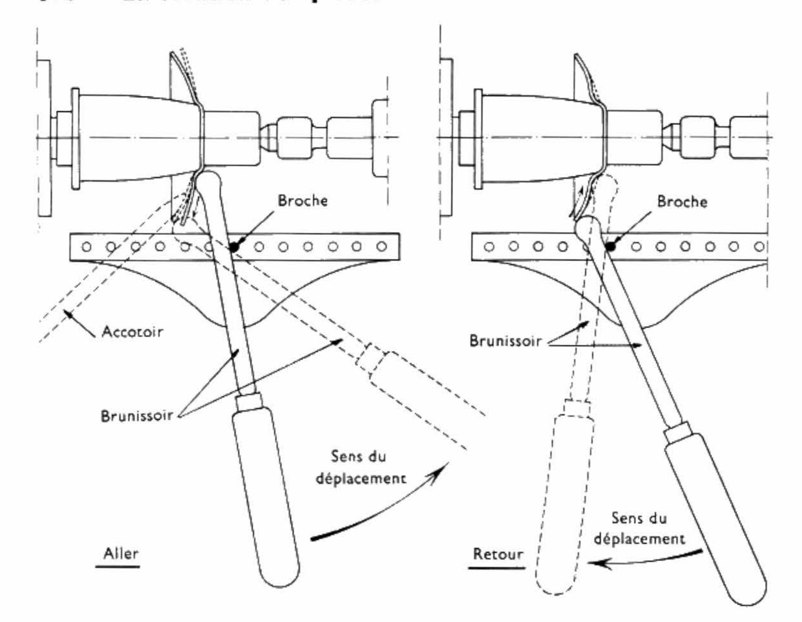
Centreur à galets (*Rondolotti*)

3. REPOUSSAGE DES DIFFÉRENTS MÉTAUX

3.1. Travail du repousseur. — Le mandrin étant monté sur le tour, on serre le flan contre ce mandrin avec la poupée mobile par l'intermédiaire du centre et l'on fait tourner l'ensemble. À l'aide de ses outils, le repousseur exerce sur le métal une pression jusqu'à lui faire épouser la forme du mandrin, mais la déformation s'obtient progressivement, par passes successives. Il se sert de son outil en levier et communique à la partie qui travaille un mouvement de va-et-vient du centre de la pièce à l'extérieur du flan, en appuyant la partie travaillée du métal contre l'outil à l'aide de la cale tenue de la main gauche.

Comme le flan tourne à grande vitesse et n'est travaillé qu'en un point, la déformation instantanée reste relativement faible, et la mise en forme est très régulière. Cette déformation doit être une combinaison judicieuse de rétreint, c'est-à-dire de compression tangentielle et d'étirage, c'est-à-dire de traction longitudinale.

Dans le repoussage au chariot à la molette, l'ouvrier manœuvre celui-ci de façon à ce que les déplacements de la molette soient analogues à ceux d'un outil manuel. L'utilisation d'un déplissoir n'étant pas possible, ce mode de repoussage n'est intéressant que dans le cas où le métal a peu tendance à plisser : travail à chaud, métal épais ou formes peu profondes, etc. Toutes choses égales par ailleurs, les performances possibles sont meilleures dans le travail à la main que dans le travail au chariot.



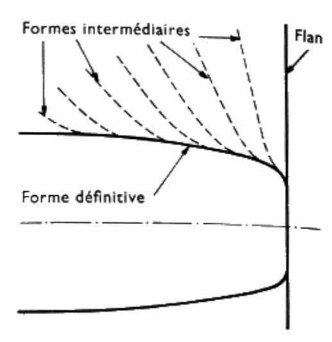


Fig. IV-12 — Phases successives du repoussage d'une timbale

Fig IV-11

Mouvement approximatif de l'outil

À titre indicatif, la figure IV-11 donne une idée des déplacements du brunissoir pendant un aller et retour de l'outil, et la figure IV-12 montre schématiquement les positions successives du métal après les coups successifs de brunissoir nécessaires au repoussage d'une timbale. Ces phases successives ne peuvent être mieux explicitées, car leur nombre même est variable puisqu'il dépend de l'habileté et surtout de l'expérience de l'ouvrier.

3.2. Modes de travail suivant la nature des métaux à repousser

3.2.1. Vitesse de rotation. — Elle doit varier suivant le diamètre de la pièce, de manière que la vitesse linéaire soit sensiblement constante, quel que soit le diamètre. Les tours, avec ou sans boîte de vitesses, permettent de tourner de 50 tr/mn à 2 000 tr/mn environ.

Indépendamment de cette conversion arithmétique, la nature des métaux à repousser influe sur la vitesse de rotation à choisir : très rapide pour l'aluminium, elle doit être réduite pour les métaux cuivreux et relativement lente pour les métaux ferreux ou inoxydables (de 2 000 tr/mn à 500 tr/mn environ).

3.2.2. Opérations préparatoires. — Lorsqu'il s'agit de pièces relativement profondes, il y a lieu de prévoir des passes successives sur mandrins intermédiaires avant d'arriver à la forme et aux cotes définitives. Le nombre de passes à prévoir est d'autant plus grand que le métal travaillé est plus élastique. Pour la même pièce, si deux opérations sont suffisantes pour de l'aluminium, il en faudra quatre ou cinq pour le laiton ou l'acier inoxydable.

Les formes des passes intermédiaires sont déterminées par expérience, et sont en général coniques, à angle de plus en plus fermé, le diamètre de départ étant celui de la pièce finie. Il est nécessaire d'effectuer une recuisson entre deux passes lorsqu'il s'agit d'alliages légers, de métaux cuivreux, ou d'aciers inoxydables (V. § 3.3.2).

3.3. Lubrification et traitements thermiques

3.3.1. Lubrification. — Quel que soit le procédé employé, à la main, au chariot, ou autre et quelle que soit la nature du métal, il est nécessaire de lubrifier la surface en contact avec l'outil ainsi que les mandrins afin de faciliter la sortie de la pièce finie et d'éviter les grippures à l'intérieur de celle-ci.

On emploie depuis toujours le suif qui est appliqué sur le disque, au départ, à l'aide de boudins de chiffons roulés serrés, vulgairement appelés « salopettes ». Pour rendre le suif plus fluide il est d'usage de le mélanger avec un peu d'huile minérale à chaud. Pour obtenir des angles bien marqués sur certaines pièces, on utilise également des savons noirs (à déconseiller pour l'aluminium). Sont employées dans certains cas : la paraffine, la vaseline, l'huile de pied de bœuf.

Les lubrifiants, quels qu'ils soient, peuvent toujours être améliorés en y adjoignant du soufre ou du graphite. Il est intéressant de connaître les traitements de surface que la pièce repoussée est appelée à subir pour le choix des lubrifiants, afin que leur élimination puisse être assurée par des solvants chlorés, de façon simple, à moindre frais et sans attaquer la surface.

3.3.2. Traitements thermiques

a) *Recuisson.* — On procède à ces opérations lorsqu'on ne peut pas faire autrement, plus précisément, lorsque la profondeur de la pièce est telle qu'on ne peut mener à bien son exécution complète sans cassure ni déchirure.

En effet, surtout lorsqu'il s'agit de métaux cuivreux, d'aciers inoxydables ou de certains alliages légers, après un certain nombre de coups d'outil, le métal travaillé atteint un degré d'écrouissage tel qu'il n'est plus possible de le repousser davantage. Lorsqu'il s'agit de quelques pièces seulement, la recuisson du cuivre ou du laiton est faite au chalumeau à gaz, par l'ouvrier repousseur lui-même (il doit avoir l'œil suffisamment exercé pour se fier à la couleur). Pour un travail en série on utilise un four (à gaz, au fuel, ou électrique) muni d'un thermostat.

Les températures de recuisson sont les suivantes :

Aluminium A4 et A5 et alliages d'aluminium	380 à 400 °C
Aluminium A9	320 à 360 °C
Argent	650 °C
Cuivre	700 °C
Laiton	750 °C
Maillechort	800 °C
Nickel	900 °C
Or	650 °C

Le zinc, se travaille à chaud.

Le refroidissement peut être rapide pour tous ces métaux, et il est même recommandé de plonger le cuivre dans l'eau froide pour éliminer la calamine. Le refroidissement doit être lent pour certains alliages légers tel que l'A-SG qui se trempe à l'air.

Suivant leur composition, les aciers inoxydables sont recuits à des températures de 1 050 à 1 150 °C et refroidis rapidement à l'eau. Toutefois, sauf pour le NS MC (acier austénitique), à l'air il se forme beaucoup de calamine et un traitement en atmosphère contrôlée est recommandé. Si cette précaution n'est pas prise, surtout dans le cas de plusieurs recuissons successives, les pièces sont tellement marquées en surface qu'il est impossible de les rendre propres, même avec un polissage énergique.

b) *Traitements thermiques après formage.* — Certains alliages, choisis par l'utilisateur des pièces pour leurs bonnes caractéristiques mécaniques dans un certain état

métallurgique, sont travaillés par le repousseur à l'état doux, c'est-à-dire à l'état recuit, et doivent subir après formage le traitement thermique qui leur confère les caractéristiques que l'on escompte. Souvent, ce traitement thermique déforme plus ou moins les pièces et le repousseur doit envisager de les reprendre pour une conformation. Il en est ainsi pour certains alliages d'aluminium comme l'A-U4G (trempe à l'eau depuis 500 °C), l'A-SG (trempe à l'eau depuis 530 °C, puis revenu pendant 4 h à 175 °C).

Pour d'autres raisons, il en est de même pour certains métaux : par exemple, pour parfaitement résister aux milieux corrosifs, certains aciers inoxydables écrouis par le repoussage, après le travail à froid, doivent être adoucis par un chauffage à la température de recristallisation suivi ou non d'une trempe.

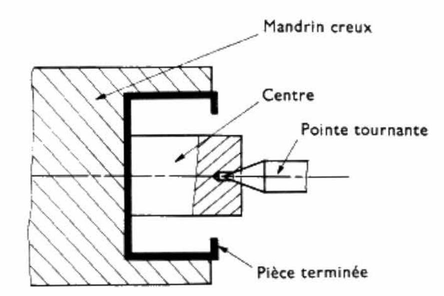
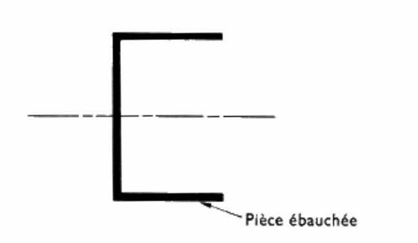


Fig. IV-13



c) *Travail à chaud.* — On a recours à ce procédé dans des cas très particuliers, surtout pour le repoussage de certains alliages légers (AG5, A-U4G) d'assez grande épaisseur et de tôles très épaisses.

Il y a lieu de prévoir un préchauffage du mandrin afin d'éviter une perte de chaleur importante de la pièce au contact de celui-ci. La pièce est réchauffée au four, et ensuite maintenue à la température désirée à l'aide d'un chalumeau fixé sur le tour, cela pendant toute l'opération de repoussage. Les molettes et les tours utilisés pour ce genre de travail subissent une usure extrêmement rapide, ce qui grève très sensiblement le prix de revient.

d) *Décapage.* — Après la dernière recuisson, et avant la passe de finition, les pièces en cuivre et alliages de cuivre (laiton, maillechort, etc.) sont dérochées dans un bain d'acide sulfurique étendu de deux fois son volume d'eau, puis rincées à l'eau et séchées.

3.4. Détermination des flans. Tolérances

3.4.1. Détermination des flans. — Il n'existe pas de règle absolue pour le calcul du diamètre du flan à utiliser. Du fait de l'amincissement assez irrégulier, qui dépend de l'ouvrier, de l'épaisseur du métal, de la grosseur de l'outil employé, il n'y a guère que l'expérience qui permette, après un ou plusieurs essais, de déterminer cette cote, avant le démarrage d'une série. Quelle que soit l'importance de la pièce, il est presque toujours possible de lui faire subir un plus ou moins grand allongement, et donc d'utiliser le flan dont le diamètre est le plus favorable (d'un point de vue économique) lorsque ce flan est découpé dans des feuilles de dimensions normalisées (généralement 2 000 × 1 000). Dans le cas de pièces cylindriques, on considère que le diamètre du disque doit être voisin de la somme du diamètre de la pièce plus une hauteur.

3.4.2. Tolérances. — Ce qui vient d'être dit explique que les tolérances sur l'épaisseur des pièces repoussées, et en conséquence les tolérances sur les diamètres extérieurs, doivent être assez larges. Seuls les diamètres intérieurs sont assez réguliers (sur outillages métalliques, on peut obtenir $d\,^{+\,0,1}_{-\,0}$ ou $d\,^{+\,0,2}_{-\,0}$). Si le diamètre extérieur doit être compris dans un intervalle très étroit, on a recours à des opérations supplémentaires. On exécute des pièces d'une épaisseur supérieure à l'épaisseur finale demandée et on calibre celles-ci dans une matrice en « passe-à-travers » pour les amener à la cote (pour les pièces cylindriques), ou on les reprend au tour parallèle, pour obtenir le même résultat par enlèvement de copeau.

Pour donner une idée des variations d'épaisseur, nous prendrons une casserole cylindrique de 220 millimètres de diamètre et de 110 millimètres de hauteur comme exemple. Partant d'un disque de 20/10 d'épaisseur, cette cote est sensiblement conservée jusqu'à 15 mm du fond, puis elle est réduite à 12 ou 13/10 à la moitié de la hauteur, et elle atteint progressivement 22 ou 23/10 sur le bord. Cela bien entendu, en repoussage courant, en grande série, sans prendre de précautions particulières.

4. EXÉCUTION DES PIÈCES REPOUSSÉES

4.1. Pièces simples. — Ce sont des pièces de révolution dont le diamètre d'ouverture est égal ou supérieur au diamètre de départ, et qui ne comportent aucun étranglement. Leur réalisation ne pose pas de problème particulier.

4.2. Pièces à ouverture refermée. — Il ne peut s'agir que d'un retour dont la largeur est relativement faible par rapport au diamètre initial et dont l'exécution reste compatible avec la limite d'élasticité du métal employé.

4.2.1. En mandrin creux. — Dans le cas où les tolérances ne sont pas trop serrées et où l'état de surface n'a pas d'importance, il suffit de baisser le bord de l'ébauche à l'aide d'une pince à border (V. fig. IV-4), la pièce étant prise à l'envers dans un mandrin creux (fig. IV-13).

4.2.2. En décentré. — La pièce, abondamment graissée à l'intérieur, est prise en contre-pointe sur un mandrin décroché à l'arrière, et dont le diamètre est inférieur à celui de l'ouverture de la pièce finie. La contre-pointe est décentrée de la différence des deux rayons, de manière à ce que la paroi de la pièce soit au contact du mandrin au point de travail (fig. IV-14).

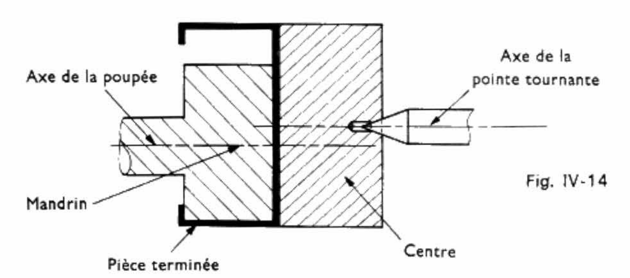


Fig. IV-14

4.2.3. Sur mandrin brisé. — Voir paragraphe suivant.

4.3. Pièces en contre-dépouille sur brisures. — C'est le procédé le plus rationnel pour obtenir des pièces de bonne venue, mais les outillages sont coûteux et la manipulation des brisures ne permet pas de grandes cadences pour la production en série. Néanmoins, dans de nombreux cas, c'est le seul moyen d'obtenir la pièce demandée. On peut ainsi réaliser des formes compliquées et non pas seulement des pièces relativement simples comme l'exemple du paragraphe précédent. C'est le cas de nombreux vases exécutés en cuivre mince et émaillés ensuite (fig. IV-15).

Un mandrin brisé est constitué d'une partie centrale ou



Fig. IV-15 (*Noury*)





Fig. IV-16

Mandrin brisé (*Rondolotti*)

noyau, sur lequel sont emboîtés (comme les quartiers d'une orange) des éléments mobiles ou brisures, le tout étant coiffé et maintenu à la partie postérieure par un galet qu'on appelle tête (fig. IV-16). Il est indispensable que toutes les parties de cet outillage soient parfaitement ajustées, le moindre jeu provoquant des marques sur la pièce terminée.

On part généralement d'une ébauche, qu'on applique sur le mandrin, et qu'on achève comme sur un mandrin normal. L'opération terminée, on sort la pièce avec les brisures à l'intérieur. L'une d'entre elles, la clé en dépouille, peut basculer vers le centre et permet de sortir toutes les autres. Au fur et à mesure on repose toutes les brisures sur le noyau (elles sont numérotées), puis la tête et l'on passe à l'exécution de la pièce suivante.

On détermine les cotes des brisures et leur nombre en fonction du diamètre d'ouverture de la pièce terminée, la plus grande dimension de la plus grande brisure devant être inférieure à celui-ci.

4.4. Pièces étranglées du genre « Diabolo ». — Pour ce genre de travail, et à condition, bien sûr, que la pièce soit ouverte à chaque extrémité, on exécute celle-ci sur un mandrin à tête, ou mandrin à dégorger, dont la partie mobile est extraite après défonçage à la volée (fig. IV-17). Cet outillage est beaucoup moins onéreux qu'un mandrin brisé, et les cadences d'exécution des pièces sont beaucoup plus grandes.

4.5. Pièces à goulot. — Généralement il s'agit d'articles de ménage (tels que des boîtes à lait ou des bidons), dont les cotes ne sont pas impératives. On emploie le procédé de repoussage « à faux », ce qui évite la fabrication d'un mandrin brisé et permet des cadences assez intéressantes. On emploie un mandrin du diamètre intérieur de la pièce à l'endroit de l'étranglement; on part d'une ébauche cylindrique et le métal est travaillé dans le vide jusqu'au contact du mandrin (fig. IV-18).

4.6. Cercles, couronnes, pièces tubulaires. — Lorsqu'il s'agit de réaliser en série des pièces de diamètre d'ouverture considérable par rapport au diamètre total et de faible hauteur ou des pièces tubulaires peu ouvragées, il n'est pas avantageux de partir d'un disque pour leur exécution, surtout si elles doivent être en aluminium, en alliages légers ou en métaux cuivreux. Pour les cercles, la masse de la défonçure, généralement revendue au prix du déchet, est grande par rapport à la masse de l'article fini, et le prix de revient serait prohibitif.

Pour certaines pièces tubulaires, suivant les cotes, il se

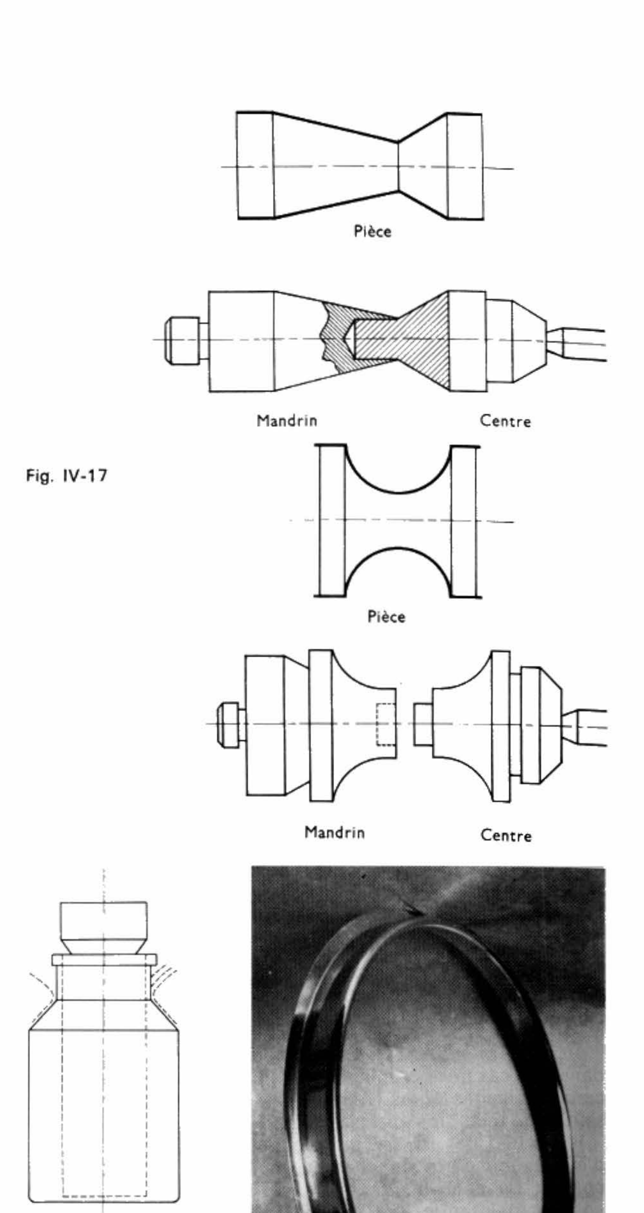


Fig. IV-17

Fig. IV-18

Fig. IV-19 (*Noury*)

trouve parfois que la découpe en rectangles permet un gain de matière tel que la fabrication en disque serait beaucoup plus onéreuse, compte tenu des formats de « planches » actuellement normalisés.

Dans ces deux cas, on part d'une bande dont les coupes sont soudées bord à bord, ou d'une virole roulée et également soudée. Il existe actuellement des métaux d'apport et des décapants d'une telle qualité, que la soudure est pratiquement invisible après repoussage. L'exemple le plus typique est celui des entourages de cadrans de bascules en laiton. Partant d'une bande soudée du diamètre de la partie cylindrique, en relevant d'abord un bord et, retournant l'ébauche, en roulant l'autre extrémité sur un seul mandrin aux cotes définitives, on obtient des pièces parfaites (fig. IV-19).

4.7. Repoussage par l'intérieur. — Pour certaines pièces à usage mécanique, par exemple des pièces d'aéronautiques dont les diamètres extérieurs sont impératifs, on utilise le procédé de « gonflage ». Partant généralement

d'une virole, ou d'une ébauche au petit diamètre, dans un mandrin creux en morceaux démontables, on amène celle-ci à la forme et aux cotes de l'intérieur du mandrin, généralement à l'aide d'un chariot hydraulique. Le prix de revient est extrêmement élevé.

4.8. Pièces obliques. — Il est possible d'exécuter certaines opérations de repoussage telles que des relevés de bord sur des pièces en oblique, à condition de disposer d'un mandrin spécial, dont l'usinage est relativement coûteux (fig. IV-20).

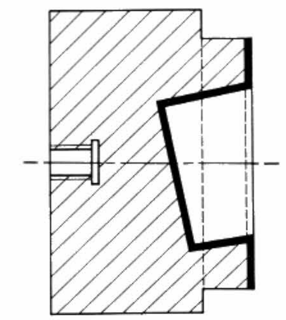


Fig. IV-20

4.9. Pièces elliptiques. — Il existe depuis fort longtemps un appareil permettant de repousser des pièces ovales, au tour. Il s'agit d'un plateau à glissières réglables sur un vernier, agissant de telle manière que le mandrin ovale présente une génératrice restant équidistante du support, et réglé exactement à la hauteur du centre de la broche (fig. IV-21) ; cela permet à l'ouvrier de travailler

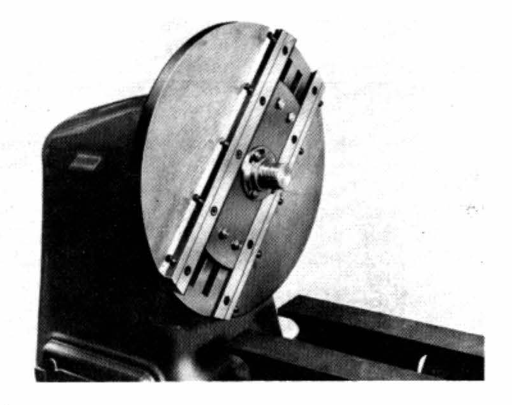


Fig. IV-21

Plateau elliptique
(*Denn-Hijo de Juan Puigjaner*)

comme s'il s'agissait d'une pièce circulaire, mais interdit, évidemment, de travailler « sous le bras ».

Pour le serrage du flan, si la pièce doit être défoncée, on utilise une broche filetée, vissée dans le mandrin, traversant le flan percé au préalable en son centre. Sinon, un centre ovale, aux cotes de départ de la pièce, et dont la tête métallique navigue sur un plateau lubrifié fixé à la contre-pointe, est utilisé.

Étant donné que le système de réglage du plateau fixe définitivement la différence des deux diamètres à toutes les hauteurs de la pièce, les créateurs de pièces ovales sont obligés de respecter cette condition pour l'étude des modèles qu'ils ont l'intention de faire fabriquer. Autrement dit : un réflecteur de forme elliptique dont les diamètres d'ouverture sont 450 et 300 mm, si son fond est plat, le grand diamètre de celui-ci étant de 200 mm, le petit diamètre ne pourra faire que 50 mm.

Le repoussage ovale fut utilisé surtout, il y a quelques années, pour la platerie (elle se fabrique maintenant, en grande série, par estampage). La fabrication de réflecteurs d'éclairage public elliptiques a imposé un retour à cette technique (fig. IV-22).

4.10. Pièces prismatiques. — Il est possible de transformer une ébauche cylindrique en pièce à section octogonale, hexagonale, ou même carrée grâce à un outillage spécial. À cet effet on utilise des outils manuels montés sur ressorts, ou des molettes de chariots montées sur un porte-molettes, également à ressorts. C'est là un procédé empirique, utilisé autrefois pour certaines pièces d'orfèvrerie.

5. REPOUSSAGE HYDRAULIQUE

5.1. Matériel. — Après le repoussage à la main, puis la mécanisation élémentaire, on a pensé à utiliser une source d'énergie contrôlée. Sur des tours classiques ou à boîte de vitesses on a employé l'énergie hydraulique pour fournir tous les efforts nécessaires à l'obtention des pièces : serrage des disques ou des ébauches sur le mandrin, centrage, déplacement des outils, rognage et roulage des bords, éjection de la pièce terminée.

5.1.1. Chariots hydrauliques. — Ceux-ci sont dérivés des chariots à manivelles, seule la source d'énergie est différente. On obtient ainsi une plus grande régularité dans les mouvements transversaux et longitudinaux, une puissance bien supérieure et une précision accrue ; l'amincissement du disque se trouve ainsi beaucoup mieux réparti. Ces chariots peuvent se monter sur des tours classiques (fig. IV-23).

Fig. IV-23

Tour à repousser hydraulique ; diamètre admis : 700 mm
(*Termoz*)

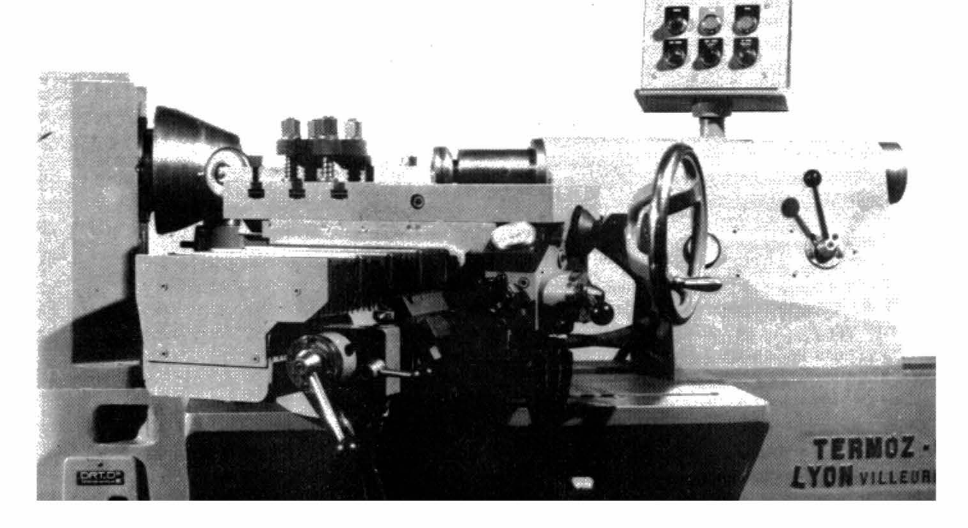


Fig. IV-22

Réflecteur d'éclairage public
(*Boiron-Mazda*)

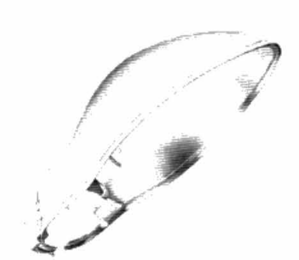
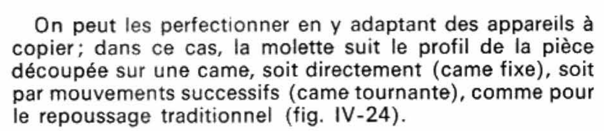
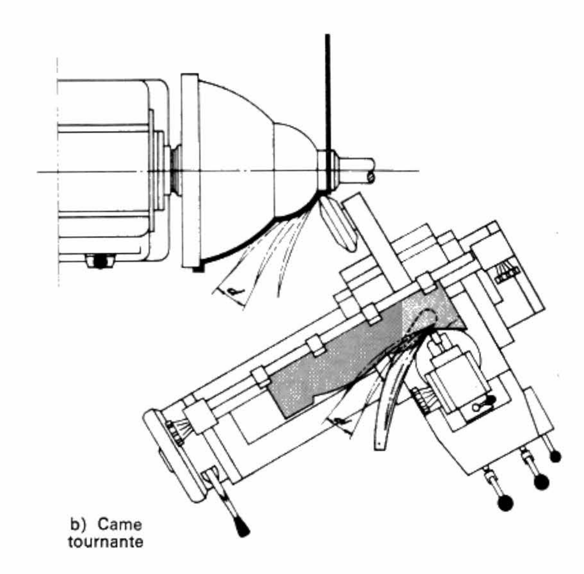


Fig. IV-24





On peut les perfectionner en y adaptant des appareils à copier; dans ce cas, la molette suit le profil de la pièce découpée sur une came, soit directement (came fixe), soit par mouvements successifs (came tournante), comme pour le repoussage traditionnel (fig. IV-24).

5.1.2. Contre-pointes hydrauliques. — Ce moyen de serrage, plus que les contre-pointes manuelles, permet de « doser » la pression au centre de la pièce. Dans le cas de pièces sphériques, par exemple, il favorise une parfaite adhérence du disque sur le mandrin et évite le décentrage en cours d'exécution.

5.1.3. Appareils à détourer et à border hydrauliques. — S'il est relativement facile de rogner et de rouler les bords des pièces repoussées à la volée, quand celles-ci sont exécutées manuellement, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de repoussage au chariot. Ce problème a été résolu sur les tours hydrauliques, grâce à l'adjonction d'appareils spéciaux à deux ou trois molettes, exécutant automatiquement ces opérations à la fin du repoussage (fig. IV-25).

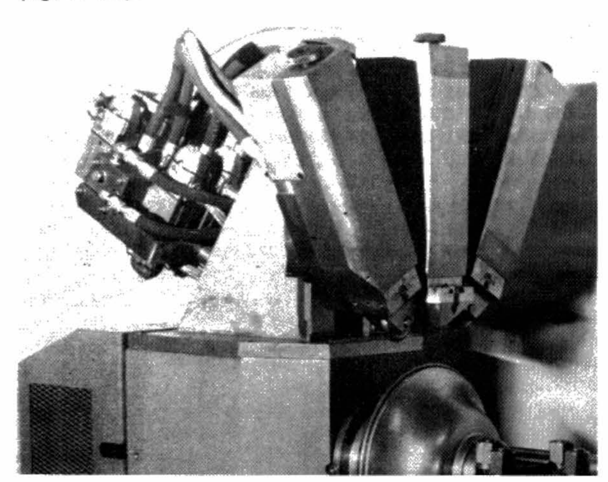


Fig. IV-25 — Tour équipée de trois chariots radians pour travaux d'affranchissage et de bordage (*Termoz*)

5.1.4. Contre-appuis hydrauliques. — Le chariot normal n'est utilisé que pour le repoussage de pièces d'épaisseurs telles que leur exécution à la main ne peut se concevoir.

Sur un tour hydraulique, on peut adapter un appareil de contre-appui qui facilite le travail sur métaux d'épaisseurs relativement faibles.

5.1.5. Éjecteur hydraulique. — La séparation de la pièce terminée et du mandrin a toujours été une opération délicate, à plus forte raison pour les pièces cylindriques. Ce problème est facilement résolu, sur les tours hydrauliques, par l'emploi d'un appareil d'éjection actionné par une tige coulissante dans l'alésage de la poupée et du mandrin (fig. IV-26).

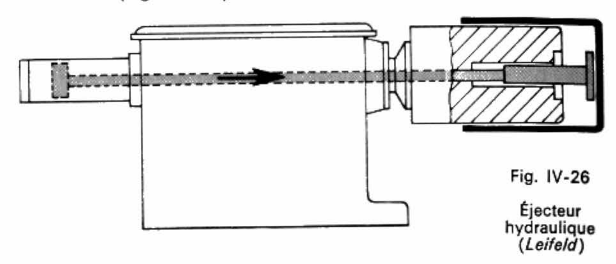


Fig. IV-26

Éjecteur hydraulique (*Leifeld*)

5.2. Fluoprojection. — L'application de l'hydraulique au repoussage, en particulier la possibilité de réglage et la régularité de l'effort appliqué ont permis de mettre au point la technique assez spectaculaire de fluoprojection. Elle n'est applicable que pour la fabrication de pièces coniques, convexes ou concaves dont la conicité est échelonnée entre 13 et 80°.

On part d'un disque dont le diamètre est celui de la pièce finie et le volume de la toile de cette pièce provient de la diminution d'épaisseur du disque. On calcule l'épaisseur du disque au moyen de la formule suivante:

$$s_1 = s_0 \sin \alpha \text{ (fig. IV-27 a et b)}$$

On travaille de préférence avec deux molettes.

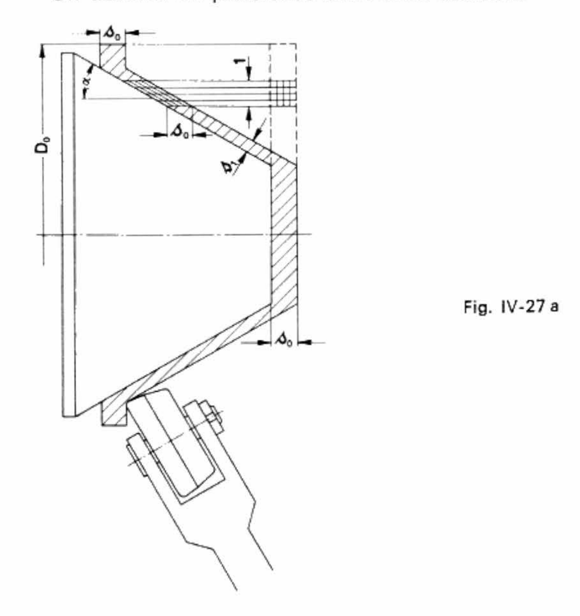


Fig. IV-27 a

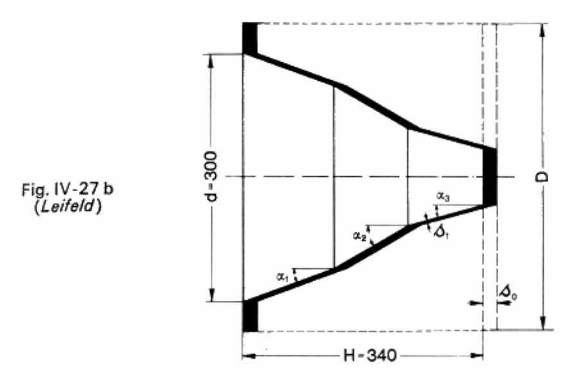


Fig. IV-27 b (*Leifeld*)

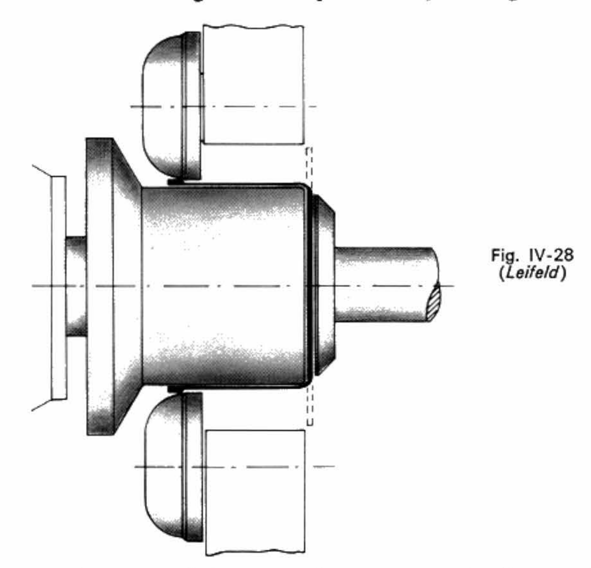


Fig. IV-28 (*Leifeld*)

5.3. Fluotournage. — Comme la fluoprojection, cette technique permet la fabrication de pièces dont la paroi est plus mince que l'ébauche employée, le fond gardant son épaisseur initiale. On peut facilement partir d'une pièce emboutie du diamètre intérieur de la pièce finie, et de forte épaisseur. On peut conserver sur une hauteur déterminée (au bord par exemple) l'épaisseur de l'ébauche.

Plus particulièrement appliqué à la fabrication de pièces cylindriques, ce procédé a permis notamment la production de casseroles à fond épais (fig. IV-28).

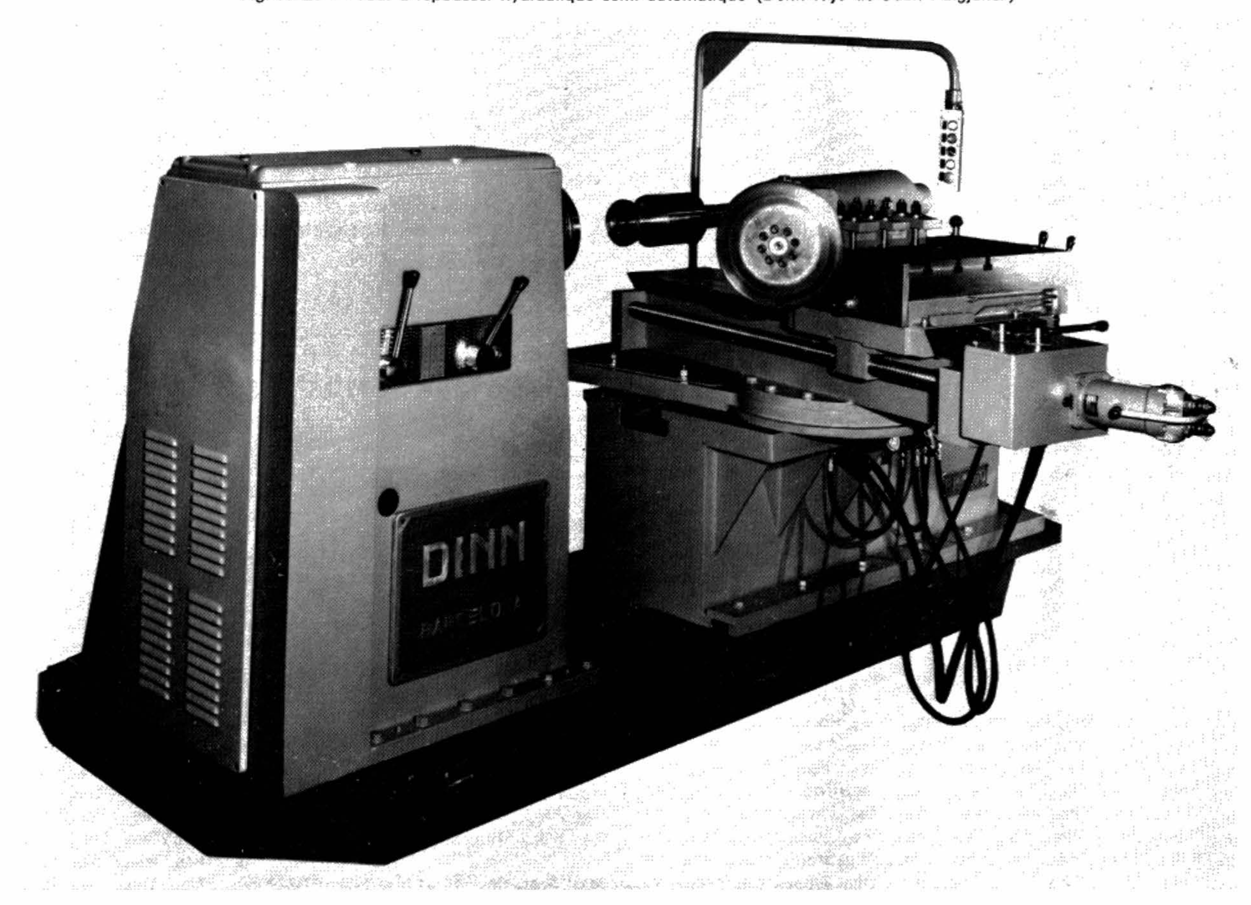
On travaille généralement avec trois molettes.

5.4. Conclusions. — Les tours à repousser, à fluoprojeter, à fluotourner hydrauliques sont une réussite mécanique moderne absolument remarquable (fig. IV-29, IV-30, IV-31).

L'aviation, avec ses exigences de résistance et de précision sur toutes les cotes, cela avec des métaux jadis réputés impossibles à repousser, a été un stimulateur important pour l'élaboration de telles machines.

Mais de tels perfectionnements se payent très cher et l'investissement n'est seulement justifié que dans un certain nombre de cas. À l'encontre du repoussage classique et des tours et outils qu'il nécessite (prix d'achat peu élevé, mandrins bon marché, montage et réglage rapides), le repoussage sur tour hydraulique implique, outre une mise de fonds initiale, un temps de montage et de réglage extrêmement important et l'emploi de techniciens bien entraînés et très soigneux. Pour ces raisons il est donc réservé, actuellement, soit à la fabrication de pièces aux tolérances rigoureuses et aux formes telles qu'il serait impossible de les obtenir autrement, pour l'aviation et pour l'industrie, soit à la production de pièces de très grande série, qui sortent à cadence élevée et dont le prix de revient et l'aspect de finition permettent de concurrencer avantageusement l'emboutissage.

Fig. IV-29 — Tour à repousser hydraulique semi-automatique (*Denn-Hijo de Juan Puigjaner*)



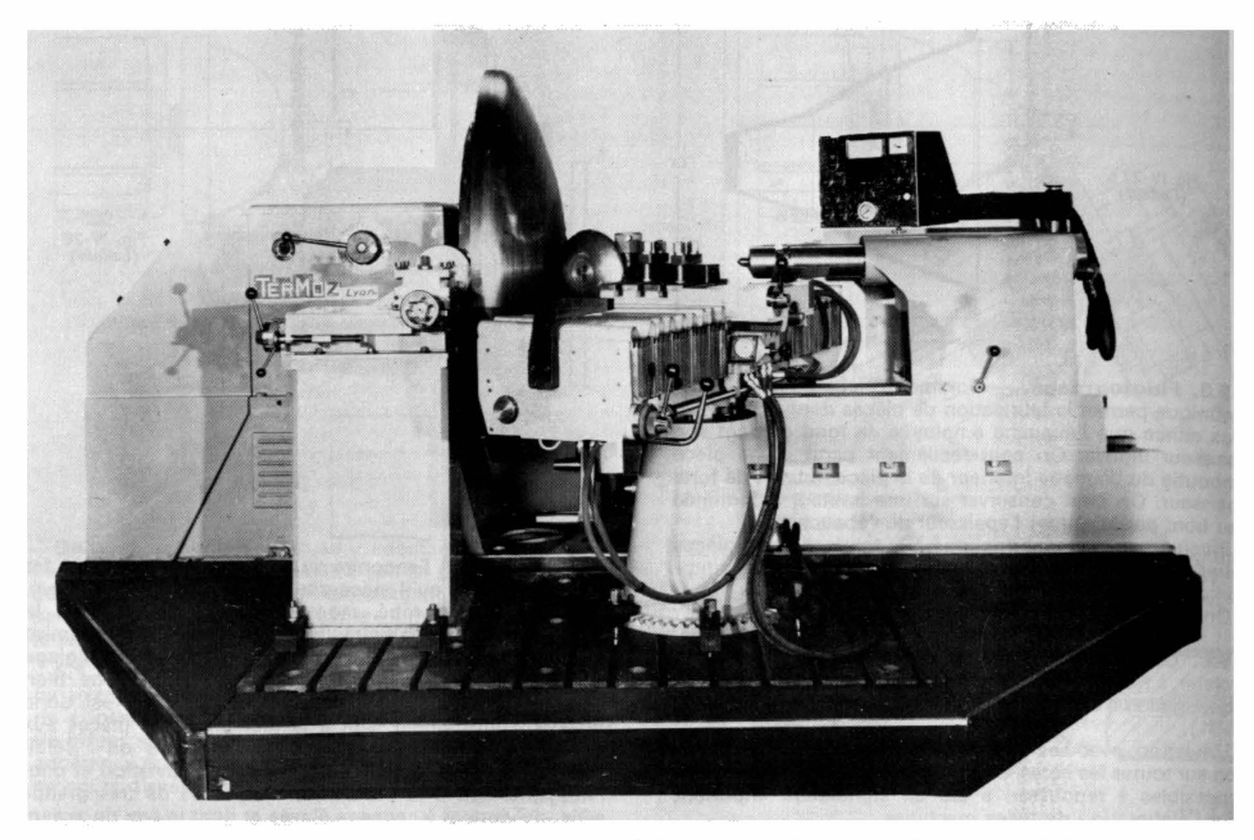


Fig. IV-30 — Tour à repousser et fluotourner; diamètre admis: 2100 mm; capacité pour l'acier doux: 6 mm d'épaisseur (*Termoz*)

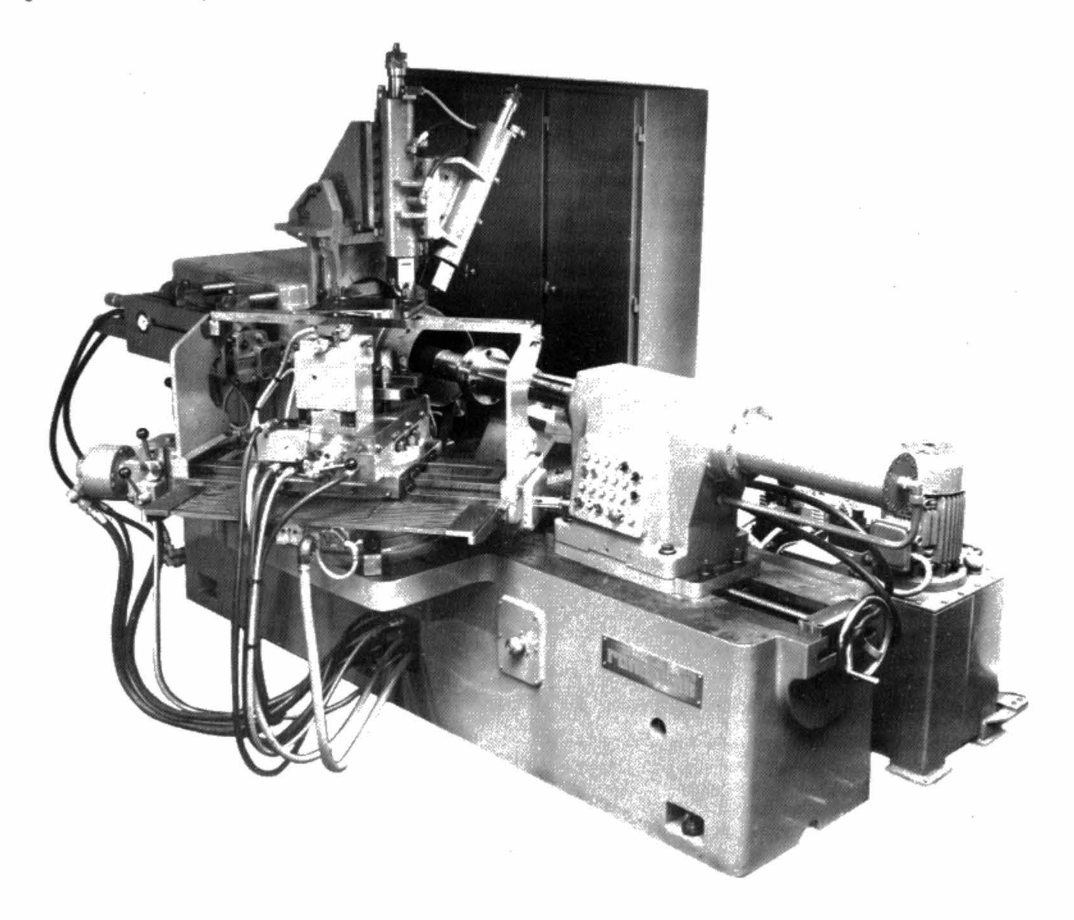


Fig. IV-31 — Tour automatique pour repoussage et fluoprojection (*H. Favroult—Rondolotti*)

CHAPITRE V

CHAUDRONNERIE

Définir la chaudronnerie c'est définir une grande industrie de base curieusement peu connue du public. Est-ce parce qu'elle est à la fois très ancienne et très moderne ou bien, surtout, parce que ses multiples domaines d'activité la rendent difficilement cernable?

Il est un fait que le vocabulaire qui la concerne est encore assez pauvre et surtout inadéquat. Ainsi les définitions généralement proposées dans les dictionnaires ne reflètent qu'en partie sa véritable vocation et ne correspondent plus aux réalités industrielles d'aujourd'hui: technique, produit ou métier, ces appellations restrictives éloignent de la réalité. De plus, n'est-il pas remarquable que seule la France désigne cette industrie par ce simple et unique vocable? À l'étranger il en est tout autrement. En anglais ou en allemand, par exemple, le terme de chaudronnerie ne comporte pas d'équivalence, ce qui tend à justifier de façon encore plus manifeste l'impossibilité d'en donner une définition claire et stricte à l'aide de quelques phrases seulement.

Mais si cette appellation est un peu vague, la chaudronnerie, elle, est une réalité tangible et incontestable. Et si une simple définition, forcément restrictive, ne saurait en aucun cas être satisfaisante, il est tout de même possible de la situer, de l'expliquer et de la cerner dans le présent. Elle est cependant essentiellement évolutive, puisque liée au progrès technique et au développement de nombreuses industries. En effet, la chaudronnerie est le fournisseur principal de la plupart des secteurs de l'économie en équipements fondamentaux.

Ses techniques permettent la réalisation d'ouvrages d'une extrême diversité que l'on peut regrouper en grandes branches technologiques comme la tôlerie ou la tuyauterie, ou en familles de produits caractéristiques tels que réservoirs de stockage, appareils à pression, bâtis soudés ou générateurs de vapeur. Les opérations de découpage, traçage, formage et d'assemblage par soudage de tôles, tubes et profilés, constituent l'activité technologique de base de la chaudronnerie. Dans ce cadre, sa véritable vocation, est la fabrication et le montage de volumes clos destinés à contenir, transporter ou transformer des fluides (liquides ou gaz) de toutes natures.

STRUCTURE ET ANALYSE D'UNE INDUSTRIE

1. DU CHAUDRON AU RÉACTEUR NUCLÉAIRE

1.1. Le cuivre et l'artisanat. — Contemporaine des *arts du feu*, la chaudronnerie est née, vers le quatrième millénaire avant notre ère, de l'idée d'employer le cuivre pour fabriquer des récipients à caractère utilitaire et durable destinés au chauffage ou à la cuisson des aliments ainsi qu'à un certain nombre d'activités artisanales. Pendant des siècles encore le cuivre est resté le seul métal disponible et apte à la fabrication de ces ustensiles.

En français, apparut d'abord le mot chaudière (du bas-latin caldaria) puis le terme de « chauderon ».

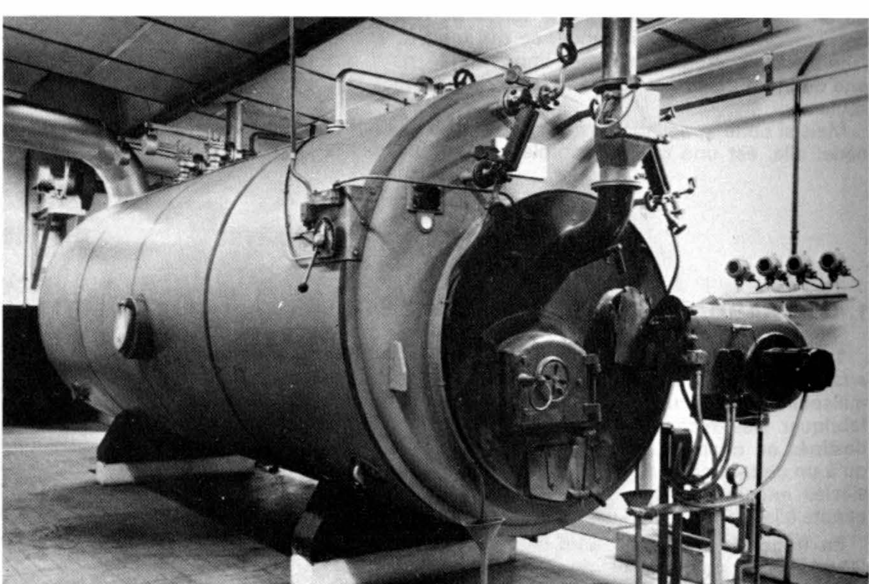
À la fin du XIIIe siècle apparaît le vocable « chauderonnier »: il désigne alors l'artisan qui fabrique et vend ces ustensiles.

La profession prend corps au XIVe siècle: en 1327 un édit royal accorde aux chaudronniers de Paris un statut qui leur permet de défendre leurs intérêts et de faire face à la concurrence des dinandiers *batteurs de cuivre*, venant de la région de Namur et de Dinant, qui commencent à s'installer vers Reims et Paris.

Ce n'est qu'au début du XVIIe siècle que l'industrie et le commerce du chaudronnier sont désignés sous le nom de chaudronnerie, terme qui recouvre également les produits. Le métal dominant reste le cuivre jusqu'au début du XVIIIe siècle; à partir de 1730 il est légèrement concurrencé par le fer-blanc et la fonte. Malgré l'utilisation de l'énergie hydraulique depuis le XVe siècle, les capactiés de production des ateliers de chaudronnerie sont encore très restreintes et les produits chaudronnés demeurent limités aux cuves et récipients divers. Cependant, un début de diversification des matériels (fromagerie, sucrerie, distillerie) et leur spécialisation fonctionnelle prennent forme. L'alambic destiné à la distillerie, premier appareil constitué d'une combinaison de capacités chaudronnées organisées, en est un exemple caractéristique.

1.2. La machine à vapeur et la chaudière. — Dès la fin du XVIIIe siècle, l'emploi de la vapeur comme source d'énergie marque le départ d'une grande mutation technologique. Le chaudronnier construit alors les chaudières destinées aux machines à vapeur, lesquelles contribuent au développement des industries mécaniques et, parallèlement, accroissent la capacité d'extraction du charbon et du minerai de fer.

Barrage de Saint-Estève-Janson : au premier plan les conduites forcées (*Brigaud-É.D.F.*)



Chaudière (*Jacques Six*)

1.3. La sidérurgie, la chimie, le pétrole, l'électricité. — Dès le début du XIXe siècle, les progrès techniques de la chaudronnerie sont naturellement étroitement liés à ceux de la sidérurgie. Successivement, l'emploi du coke dans les hauts-fourneaux, le perfectionnement des laminoirs, la production d'acier au convertisseur et son affinage au four Martin augmentent la quantité des produits sidérurgiques disponibles cependant que leur qualité s'améliore. *Les tôles et les tubes en acier deviennent les matériaux de base de la chaudronnerie.* Grâce aux machines à rouler les tôles, inspirées du laminoir, et aux presses, le chaudronnier peut augmenter ses capacités de fabrication (épaisseur, résistance et dimensions accrues des produits, délais d'exécution réduits). De plus, ces machines introduisent la première modification morphologique des appareils : aux formes plus ou moins sphéroïdales, caractéristiques du formage manuel des tôles, se substituent les formes cylindriques.



Vue des tuyauteries et installations chaudronnées d'une raffinerie à Pouillac (*Belzeaux-Heurtey*)

L'augmentation des capacités de production des produits sidérurgiques entraîne alors le développement des matériels chaudronnés pour l'équipement des industries de première transformation (habillage des hauts-fourneaux, des convertisseurs et des carcasses de fours) et contribue ainsi à sa propre évolution. Au début du XXe siècle, l'électricité se substitue à la vapeur comme source d'énergie directement convertible en énergie mécanique: la chaudronnerie participe à l'équipement des centrales hydrauliques (conduites forcées) et des centrales thermiques (chaudières, ballons, réchauffeurs, condenseurs et tuyauteries) où ces matériels sont employés dans des conditions de service de plus en plus sévères de pression et de température.

Cette extension des possibilités de la chaudronnerie, associée à l'emploi de matériaux aptes à subir l'action des produits contenus, permet alors la construction de matériels capables de reproduire à l'échelle industrielle des processus chimiques élaborés et mis au point en laboratoire. Cette possibilité marque le début du développement des industries chimiques. Ainsi de nombreuses découvertes demeurées jusque là sans application faute de moyens de production pourront être utilisées au stade industriel.

1.4. Le soudage et les progrès de la métallurgie. — À partir de 1930 le soudage remplace progressivement les autres techniques d'assemblage (agrafage, brasage, rivetage) ; son développement est rendu possible grâce à l'amélioration constante de la qualité des produits métallurgiques. Il permet d'assurer la continuité de la paroi. Cependant, ce monolithisme crée des problèmes nouveaux liés à la rigidité de l'ensemble soudé constitué de tôles épaisses; ils imposent des études plus poussées sur la résistance des matériaux. Désormais, c'est grâce à la maîtrise des techniques du soudage que l'industrie de la chimie et le raffinage du pétrole connaissent leur plein développement.

Dans le même temps, la métallurgie a dû élaborer de nouveaux alliages pour répondre aux conditions d'emploi des produits chaudronnés; les hautes pressions et les hautes températures ont imposé l'emploi d'aciers fortement alliés, les basses températures ont entraîné la mise au point des aciers au nickel et les produits corrosifs ont nécessité l'utilisation d'aciers inoxydables et d'alliages de compositions particulières. Enfin, la recherche d'une bonne résistance mécanique associée à la légèreté a conduit à employer les alliages à base d'aluminium et de magnésium.

1.5. L'atome et l'astronautique. — Dans une centrale d'énergie nucléaire, le chaudronnier rencontre des difficultés de réalisation et de manutention des matériels classiques de centrale thermique (transformation de l'énergie calorifique en énergie électrique) car leurs dimensions sont très grandes. Exemple : échangeurs ou réchauffeurs de 3 m de diamètre et de 35 m de hauteur. De plus, la construction des cuves de réacteur pose des problèmes difficiles : en effet, l'épaisseur des parois est beaucoup plus forte et les dimensions sont plus grandes que dans le cas des récipients conventionnels. Ainsi leur épaisseur approche 300 mm, leur diamètre 20 m et leur hauteur 25 m.

En outre, ces apppareils doivent satisfaire à des exigences de sécurité particulièrement sévères en ce qui concerne la tenue aux radiations, la résistance mécanique et l'étanchéité. Ces exigences ont conduit à utiliser des techniques de contrôle non destructif très élaborées. La maîtrise de ces moyens de contrôle permet d'améliorer les procédés d'élaboration d'acier sans impuretés et les techniques de soudage, ce qui accroît encore la technicité de la chaudronnerie et la qualité de ses produits.

Dans le domaine de l'astronautique, la chaudronnerie fabrique des réservoirs (hydrogène et oxygène liquides à très basse température) et des habillages dont les exigences de qualité (résistance et étanchéité), comparables à celles des matériels nucléaires, assurent la fiabilité des engins.

Ainsi, *du chaudron au réacteur nucléaire* la chaudronnerie augmente constamment son acquis technique; en collaboration avec la métallurgie, sa compétence lui permet de résoudre les problèmes de plus en plus complexes que pose la création des matériels d'équipement destinés aux industries les plus diverses.

2. DIVERSIFICATION ET SPÉCIALISATION

À l'extrême diversification des matériels, ensembles et sous-ensembles qu'il est possible de fabriquer en faisant appel aux techniques de formage du métal associées aux techniques du soudage correspond une diversification des entreprises et une tendance à leur spécialisation en fonction, d'une part, de la nature des matériaux qu'elles mettent en œuvre et des moyens dont elles disposent et, d'autre part, de leur expérience acquise, de leur technicité et de leurs secteurs de clientèle (V. § 13).

Les procédés de formage du métal, à froid ou à chaud, n'entraînent pas de modification notable de l'épaisseur du demi-produit mis en œuvre (tôle, tube ou profilé), ce qui les distingue des autres procédés (forgeage, fluotournage, etc.). Les techniques de chaudronnerie trouvent aussi des applications dans divers secteurs de l'industrie: par exemple dans la construction navale pour la fabrication des coques de navires, sous-marins et engins destinés à l'exploration des grandes profondeurs et dans la construction aéronautique pour la fabrication des cellules, carcasses de réacteurs et capotages divers.

Il est donc important de définir les domaines d'application des techniques de chaudronnerie à partir des fonctions de ses matériels (stockage, transport, transformation physique ou chimique, etc.) ou à partir de la nature des demi-produits mis en œuvre (tôles fines, moyennes ou fortes; tubes de diverses qualités) ce qui conduit à définir diverses branches technologiques (tôlerie, tuyauterie industrielle).

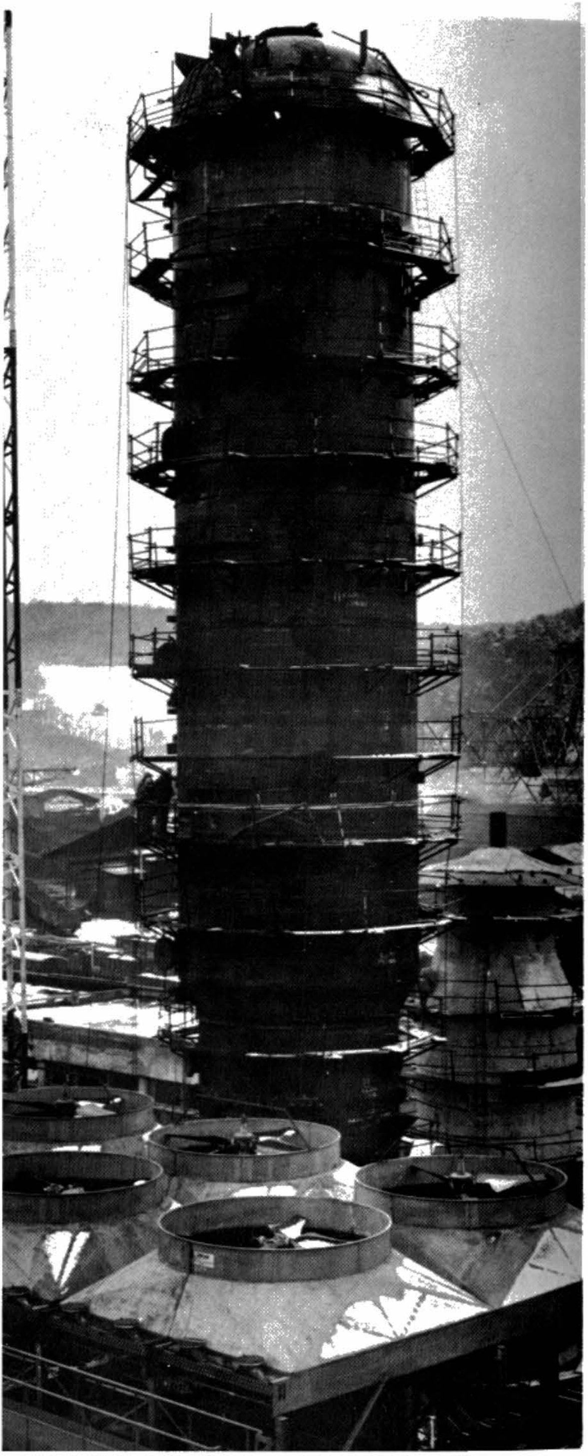
2.1. Réservoirs de stockage

2.1.1. Réservoirs cylindriques. — Divers types de réservoirs, de forme généralement cylindrique, sont utilisés pour le stockage des produits pétroliers et des produits chimiques. Leurs dimensions sont souvent importantes. Ainsi les réservoirs destinés aux produits pétroliers, qui peuvent être à toit fixe ou flottant, ont vu leur capacité passer de 30 000 m^3 à plus de 100 000 m^3 (90 mètres de diamètre et 16 mètres de hauteur) entre 1950 et aujourd'hui. Cet accroissement de capacité a été rendu possible grâce à l'emploi d'aciers à haute limite d'élasticité.

De nombreux réservoirs de moindres dimensions sont utilisés dans la plupart des usines et chez les particuliers: citernes à mazout, citernes et bouteilles à butane ou propane, réservoirs d'air comprimé.

2.1.2. Réservoirs sphériques. — À épaisseur de paroi égale, la forme sphérique permet d'obtenir une meilleure résistance à la pression que la forme cylindrique; en outre elle offre la plus petite surface extérieure pour une capacité déterminée. Pour ces raisons, et malgré l'inconvénient d'une mise en œuvre plus complexe des éléments constituant la coque, les réservoirs sphériques sont plus particulièrement destinés au stockage des gaz liquéfiés qui doivent être maintenus à basse température.

Remarque: les réservoirs de stockage contenant un



Colonne de décarbonatation de gaz de synthèse (*Belzeaux-Heurtey*)

fluide sous pression sont soumis aux mêmes règles de calcul que les appareils à pression (V. § 2.3.2).

2.2. Citernes routières et ferroviaires. — Les récipients destinés au transport de fluides (liquides, gaz liquéfiés) ou de solides pulvérulents (ciment, farine) sont des citernes ou des conteneurs-citernes. Ils peuvent être fixés à demeure sur des châssis de camions, de remorques, de semi-remorques ou de wagons et, dans ce cas, le châssis assure la fonction de poutre porteuse. Ils peuvent aussi assurer eux-mêmes cette fonction et ce sont alors des citernes autoporteuses dont la coque, renforcée aux points d'attache des essieux et de l'accouplement, constitue

Évolution de la chaudronnerie

Période	Événement
XIVe siècle	Depuis 8 000 ans, on fabrique des récipients en cuivre par martelage manuel
	1327 - Édit royal accordant un statut aux chaudronniers de Paris
XVe siècle	Emploi du martinet hydraulique actionné par des chutes d'eau
XVIe et XVIIe siècles	Les produits chaudronnés restent limités aux cuves et récipients divers en cuivre
XVIIIe siècle	**1728** - Première production du fer-blanc au Pays de Galles. Emploi du laminoir
	Le chaudron en cuivre est concurrencé par les récipients en fer-blanc et en fonte
	Premières chaudières pour les machines à vapeur, perfectionnées par Watt
XIXe siècle	**1800** - Premiers tubes en fer : une bande est soudée en hélice par martelage au *blanc soudant*
	1814 - Première presse mécanique
	1824 - Fabrication des tubes en fer par soudure longitudinale
	1830 - Premières chaudières tubulaires de Seguin
	1855 - Premiers tubes en acier laminés sans soudure (Procédé Mannesmann, toujours employé)
	1862 - Première presse hydraulique
	1865 - Première réglementation de la construction des chaudières en France (Corps des Mines)
	1891 - Premiers tubes en acier étirés sans soudure (Procédé Ehrardt)
	Développement des appareils pour la chimie minérale et le pétrole
XXe siècle	Développement des installations hydro-électriques (conduites forcées) et des centrales thermiques (chaudières, ballons de surchauffe)
	1915 - Premiers aciers inoxydables chaudronnables
	1930 - Début du soudage
	1940 - Première presse-plieuse hydraulique
	1950 - Énergie nucléaire (réacteurs et échangeurs)
	1960 - Espace et fusées. Transports massifs de gaz liquéfiés et industries cryogéniques
	1970 - Emploi des aciers trempés revenus — Maîtrise du soudage

directement une semi-remorque. Ce dernier type atteint couramment une capacité de 20 000 litres dans le cadre des limites des dimensions extérieures imposées aux véhicules routiers (transport d'essence). Circulant exclusivement sur les aéroports, des modèles de 80 000 litres assurent le ravitaillement en kérosène des avions géants.

2.3. Appareils à pression

2.3.1. Structure. — Bien que la forme sphérique présente la meilleure résistance à la pression, on lui préfère en général la forme cylindrique pour sa facilité de réalisation et malgré l'inconvénient de son épaisseur qui doit être le double de celle de la sphère de même diamètre soumise à la même pression.

L'appareil à pression le plus simple est le ballon (fig. V-1) dont la coque, constituée d'une virole cylindrique et de deux fonds bombés, est munie de tubulures à brides pour le raccordement avec les circuits de remplissage et de soutirage du produit contenu. Il comporte également un orifice de visite (imposé par la réglementation et appelé *trou d'homme*) qui permet d'effectuer des visites périodiques pour s'assurer du bon état de la surface intérieure de la paroi. Cet appareil à pression s'apparente au réservoir de stockage de mazout à usage domestique dont il diffère par l'épaisseur de la paroi et par la nature du matériau (qui est choisi pour sa résistance à l'action du fluide contenu, pour sa tenue à haute ou basse température ou pour les deux raisons).

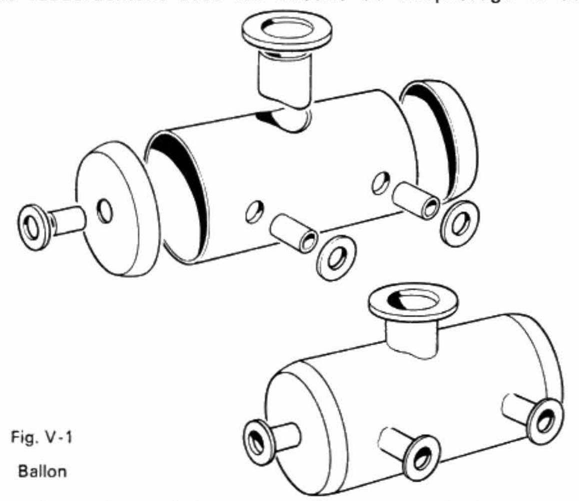


Fig. V-1

Ballon

Les appareils destinés aux industries du pétrole, de la chimie et aux usines productrices d'énergie ont en général la même forme extérieure cylindrique mais comportent, à l'intérieur, des parois annexes assurant la transformation des fluides (tubes d'échangeurs, de condenseurs ou d'évaporateurs, plaques de colonnes de distillation). Ces appareils peuvent également présenter des formes plus complexes, celles-ci se limitant souvent à des combinaisons de surfaces de révolution (cylindres, cônes, sphères et tores) que le chaudronnier sait former (fig. V-2). Dans ce cas ils sont souvent appelés *réacteurs*. La plupart des réactions chimiques s'effectuant à température élevée, les appareils correspondants sont à double paroi, le fluide de chauffage circulant entre les deux parois.

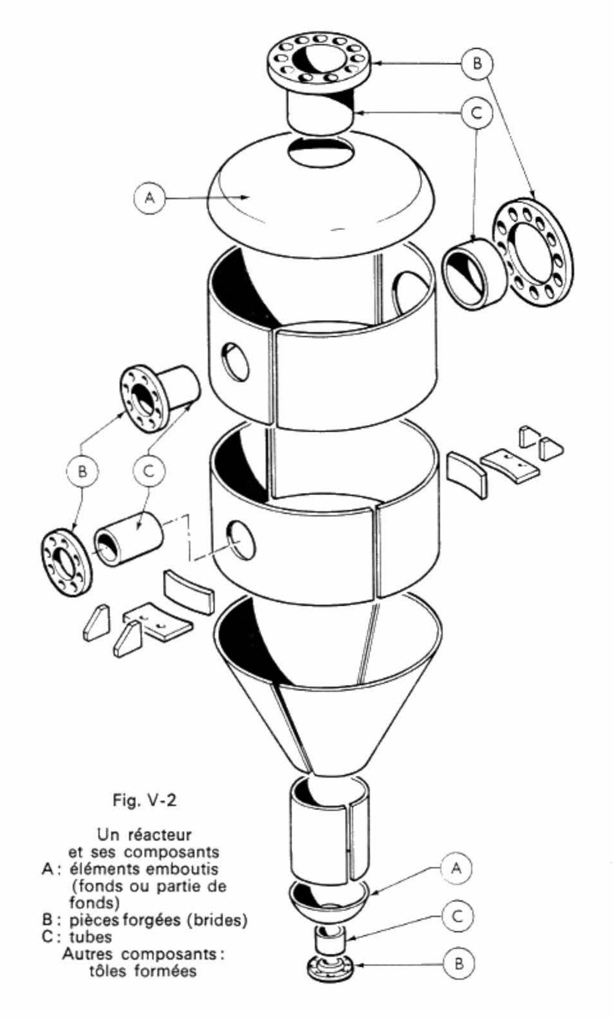
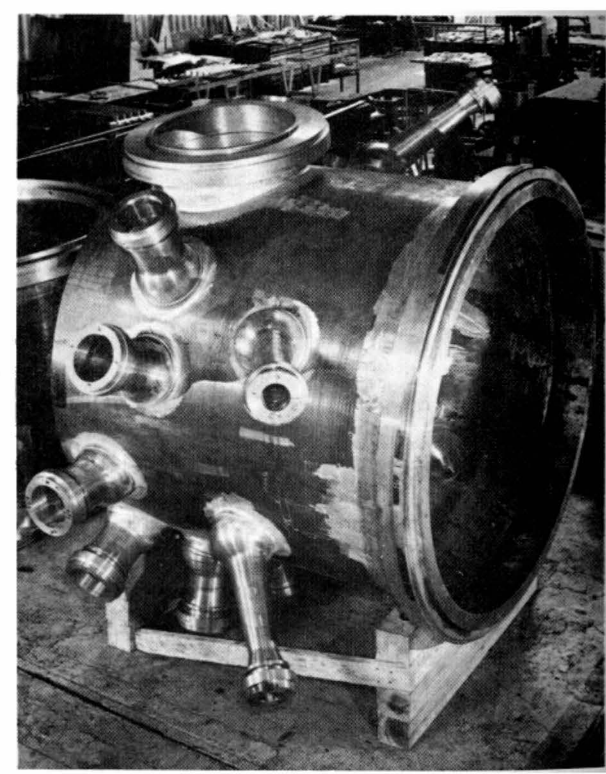


Fig. V-2

Un réacteur et ses composants
A : éléments emboutis (fonds ou partie de fonds)
B : pièces forgées (brides)
C : tubes
Autres composants : tôles formées

2.3.2. Réglementation. — Les réservoirs et les appareils destinés à contenir des fluides sous pression doivent respecter une réglementation légale qui impose, pour assurer la sécurité, des règles de calcul précises. Ces règles sont d'autant plus sévères que les dangers dus au risque d'éclatement sont plus importants, le critère de risque étant l'énergie élastique susceptible d'être libérée en cas de rupture.

L'épaisseur de la paroi d'une capacité soumise à une pression interne est calculée, d'une part, en fonction de cette pression et des caractéristiques mécaniques du matériau (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 3) et, d'autre part, en fonction de la forme de la paroi, de la technique d'assemblage et de la nature des contrôles



Cuve de réacteur nucléaire à haut flux (*Fontana et Thomasset*)



Citernes obtenues par assemblage d'éléments chaudronnés et utilisées pour le transport de produits pétroliers ou de produits chimiques (*Fauvet-Girel*)



effectués sur l'assemblage. Les règles relatives à la conception, au calcul, à la fabrication et au contrôle des appareils à pression font l'objet de nombreux codes nationaux et internationaux.

2.4. Tuyauteries industrielles. — Entre les appareils chaudronnés (réservoirs et sphères de stockage, colonnes de distillation, réacteurs, échangeurs et chaudières) il faut assurer la circulation des fluides : eau, vapeur, pétrole, produits de toute nature souvent corrosifs ou inflammables et parfois dangereux. C'est le rôle des tubes qui sont les artères et les veines des usines chimiques, des raffineries de pétrole et des centrales de production d'énergie.

Les réseaux de tuyauteries doivent être calculés au bureau d'études : en effet, la disposition des appareils à relier et les divers obstacles à contourner imposent à la tuyauterie des parcours souvent compliqués. Chaque ligne fait l'objet d'une étude particulière car les températures élevées qui règnent à l'intérieur des appareils et des tuyauteries engendrent des dilatations dont il faut tenir compte au moment de l'étude. Ces dilatations sont soit absorbées en donnant de la souplesse à la tuyauterie (lyres de dilatation), soit compensées par des soufflets dont les ondulations apportent la souplesse nécessaire (V. t. 3, Étude des constructions, chap. 8, § 1.3). L'étude du parcours et de la souplesse d'une tuyauterie est facilitée par la réalisation de maquettes à échelle réduite qui reproduisent fidèlement les conditions réelles.

Il faut également tenir compte des efforts que la tuyauterie exerce sur les tubulures des appareils. Ces efforts peuvent être calculés à l'aide de programmes exploitables sur calculatrices électroniques qui donnent en quelques secondes des résultats qui auraient exigé des jours, voire des semaines de calcul numérique, avec l'aide des machines à calculer traditionnelles. Il existe également des programmes permettant d'obtenir directement sur table traçante le tracé en perspective d'une tuyauterie à partir des coordonnées de ses coudes.

La tuyauterie industrielle constitue une branche de la chaudronnerie nettement caractérisée par ses procédés de fabrication : d'une part, formage, façonnage et assemblage à l'atelier de tronçons transportables, d'autre part, montage et assemblage de ces tronçons sur le lieu de l'installation.

2.5. Bâtis et ossatures. — Les matériels chaudronnés peuvent être également des bâtis, des ossatures ou des habillages constituant des sous-ensembles assurant des fonctions de structure portantes ou de protecteurs et intégrés à des ensembles très divers tels que machines-outils, turbines, engins de levage ou matériels de travaux publics.

Ces structures, réalisées à partir des mêmes matériaux de base (tôles, tubes ou profilés) et avec les mêmes moyens de productions que les ouvrages chaudronnés comportent, en outre, des surfaces usinées destinées à recevoir des organes mécaniques. Un traitement thermique de recuit ou de détente est presque toujours nécessaire après soudage pour éviter les déformations ultérieures (V. t. 3, Étude des constructions, chap. 7). Ces ouvrages, soudés et usinés, sont généralement désignés sous le nom d'ensembles *mécano-soudés*.

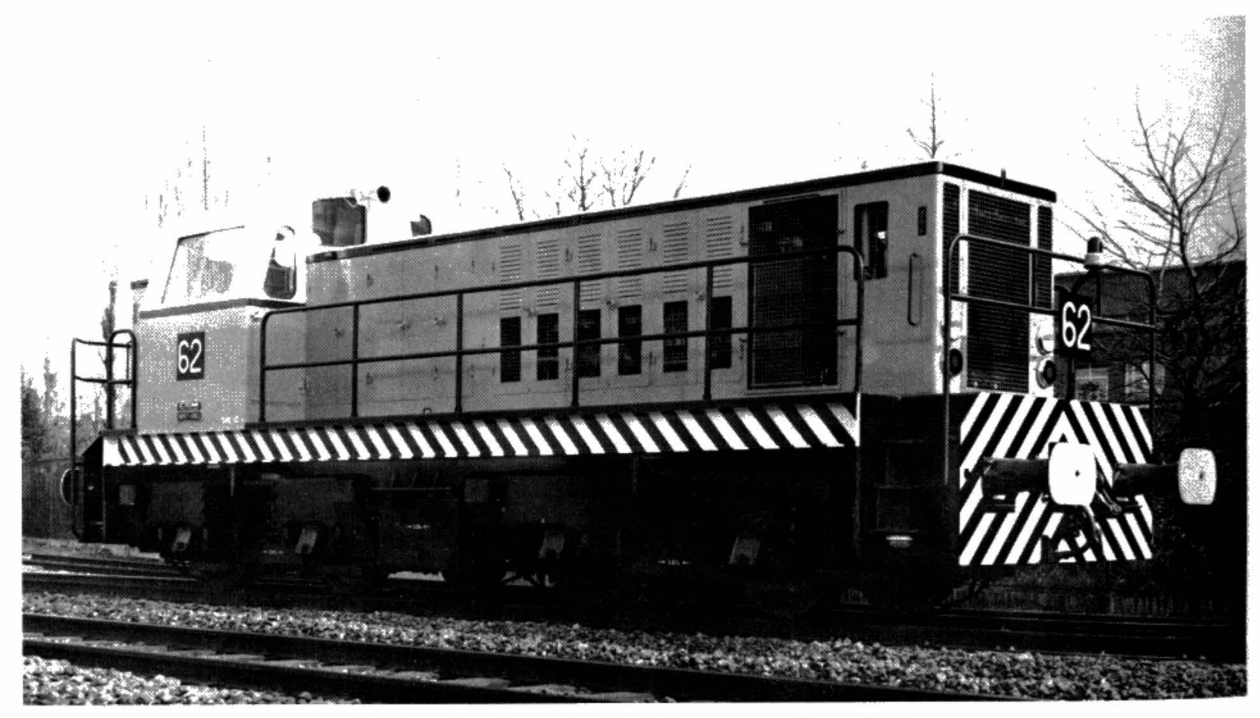
2.6. Tôlerie. — Les produits chaudronnés classés dans la tolerie sont essentiellement des capacités de rangement et des conduits d'air sans pression notable (ventilation). Ils sont généralement réalisés en tôle d'épaisseur inférieure à 3 millimètres.

— *La tôlerie courante* concerne des matériels non destinés à contenir des fluides (étuves, séchoirs, cabines de peinture et habillages de toute nature) et constitués d'éléments de tôle plane dont les bords sont pliés pour assurer leur liaison avec les autres éléments. Ces éléments sont assemblés entre eux d'une manière permanente par agrafage, soudage par points ou rivetage. Ils sont raidis soit par nervurage ou soyage, soit par des raidisseurs en tôle pliée ou en profilés du commerce souvent soudés par points.

— *La tôlerie de ventilation* concerne les gaines, hottes d'aspiration, diffuseurs, buses de distribution et cheminées où circule de l'air (éventuellement chargé de vapeurs nocives ou de gaz de combustion), soit par tirage naturel soit par tirage forcé.

— *La tôlerie fine*, ou tôlerie de précision, concerne le meuble métallique. Une de ses activités caractéristiques est la réalisation d'armoires métalliques destinées à contenir des appareils électromagnétiques ou électroniques.

— *La grosse tôlerie*, concerne plus particulièrement les ouvrages réalisés en tôles d'épaisseur supérieure à trois millimètres tels que bennes, silos, trémies, goulottes et gaines destinés à la manutention ou au stockage des produits granuleux ou pulvérulents (graviers, sables, ciment, farine ou grains).



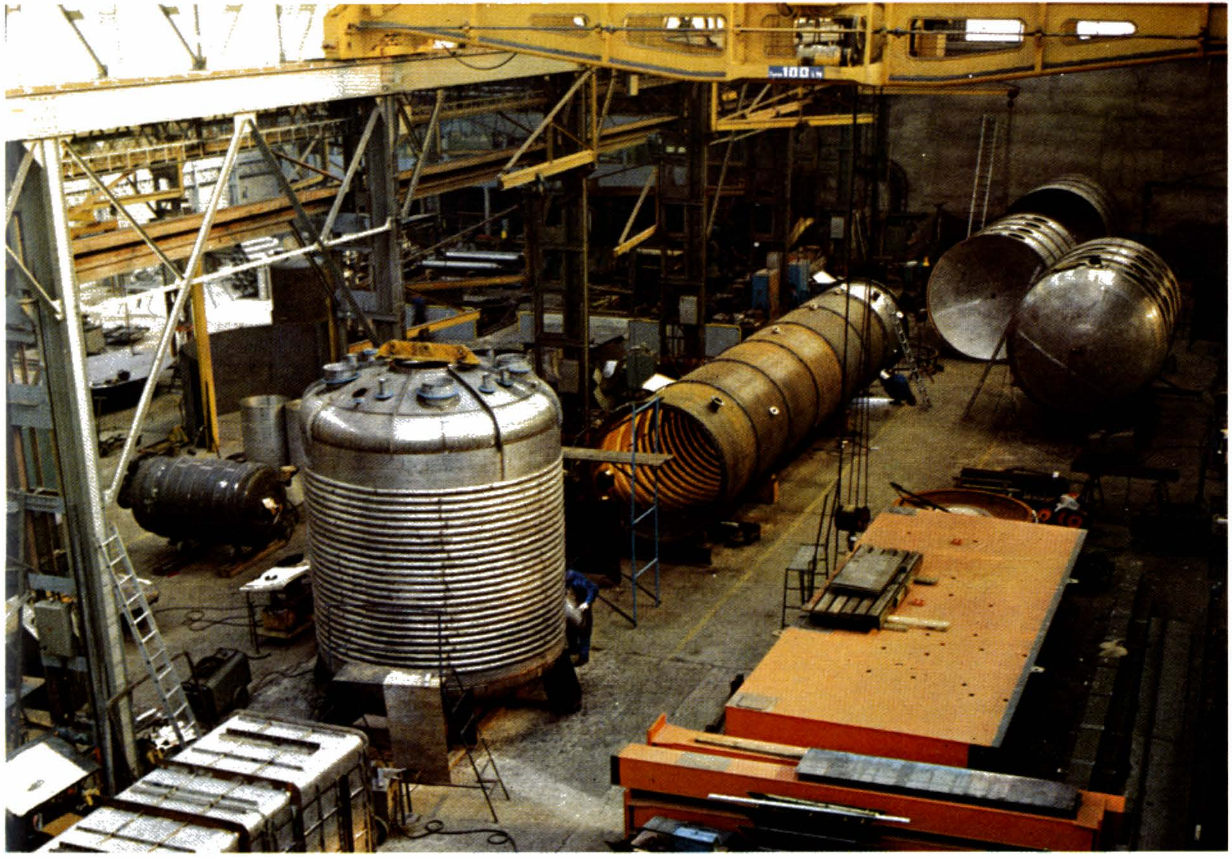
Habillage d'une locomotive Diesel de manœuvre (*Fauvet-Girel*)

Chaudronnerie

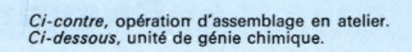


Ci-contre, montage d'un appareil sur le site : batterie d'échangeurs d'une unité de distillation.

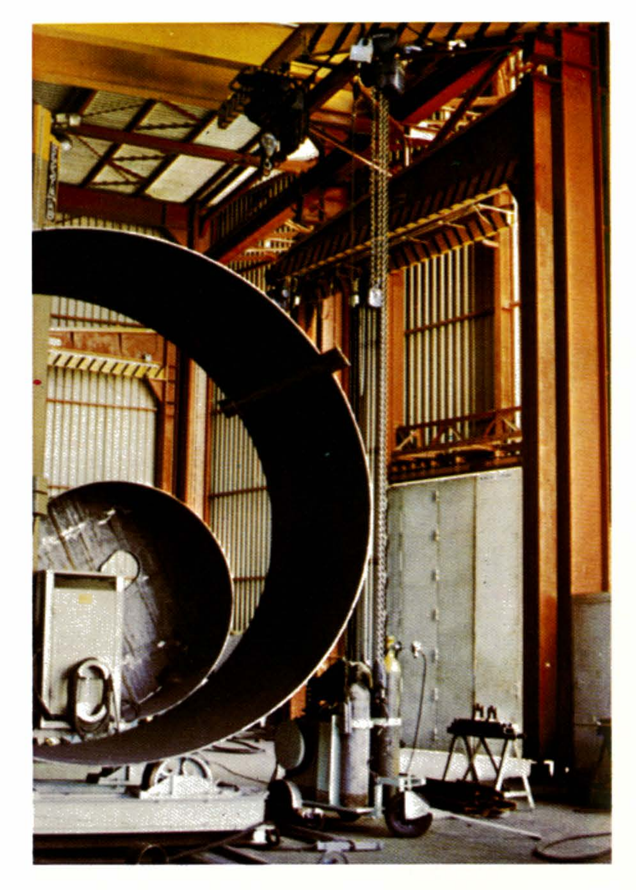
Ci-dessous, hall de montage.



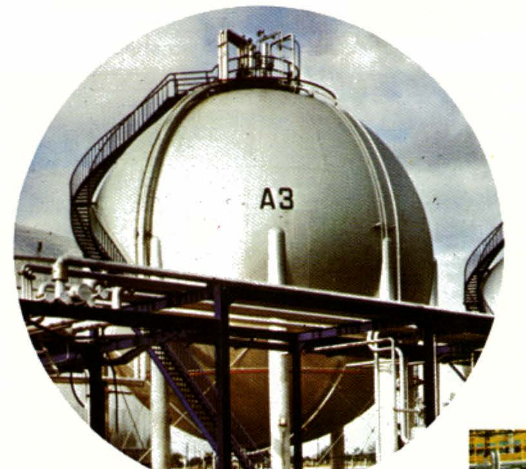
Photos : Belzeaux-Heurtey, Chaudronnerie des Roches.



Ci-contre, opération d'assemblage en atelier.
Ci-dessous, unité de génie chimique.







Ci-dessus, réservoir de stockage de butadiène.

Ci-contre, nappe de tuyauterie.



Photos : Genier, Chaudronnerie des Roches, Belzeaux-Heurtey, Yan-Heurtey.

MATÉRIAUX EMPLOYÉS

La chaudronnerie utilise toute la gamme des alliages laminés élaborés par la métallurgie moderne. Ce sont bien sûr les alliages de fer (aciers) qui sont les plus employés. Quelques autres types d'alliages sont utilisés pour résoudre des problèmes particuliers (résistance aux hautes et aux basses températures, résistance à la corrosion).

L'aptitude d'un matériel chaudronné à satisfaire aux conditions d'emploi prévues résulte directement du choix du matériau utilisé pour sa construction : les critères de ce choix sont essentiels.

3. PRINCIPAUX ALLIAGES

3.1. Compositions chimiques

3.1.1. Les alliages de fer (aciers). — Les aciers utilisés en chaudronnerie ont en règle générale une teneur en carbone limitée : C $<$ 0,25 % (V. § 2.2.1).

La majeure partie des produits chaudronnés est réalisée avec la nuance E 26 (acier de construction non allié d'usage général, NF A 35-501), avec les nuances A 42 P et A 42 C (aciers non alliés pour chaudières et appareils à pression, NF A 36-205) ou avec des nuances voisines définies par ces normes.

On utilise également des aciers à haute limite d'élasticité (très faiblement alliés, ils sont dits à *dispersoïdes :* vanadium = 0,15 % et niobium $<$ 0,05 % ; $R_e \approx$ 40 daN/mm^2 ; NF A 36-201), des aciers faiblement alliés au molybdène et au chrome-molybdène tel que 15 CD 2.05 (tôles pour chaudières et appareils à pression à température élevée, NF A 36-206), des aciers faiblement alliés et alliés au nickel (de 0,5 à 9 % de nickel, pour appareils à pressions à basses températures, NF A 36-208) et toute la gamme des aciers inoxydables austénitiques (aciers fortement alliés au chrome-nickel, tel que Z 10 CN 18.09).

3.1.2. Les alliages de nickel. — Ces alliages contiennent soit du cuivre (monel), soit du molybdène ou du molybdène et du chrome (hastelloy), soit du chrome, du fer et du molybdène. Les teneurs des éléments d'addition sont élevées (10 à 30 %) : ces alliages, de prix élevé, sont réservés à des problèmes de corrosion (V. § 2.1.2).

3.1.3. Les alliages d'aluminium. — Les nuances A-G3 et A-G5 sont utilisées pour leur légèreté (citernes routières) et la nuance A-G4 M C pour ses excellentes caractéristiques à très basse température.

3.1.4. Le titane. — Il offre une bonne résistance à la corrosion (aux composés du chlore et aux acides organiques) et constitue ainsi un complément des aciers inoxydables pour la construction d'appareils chaudronnés destinés aux industries chimiques.

3.2. Formes commerciales. — Les produits métallurgiques sont élaborés sous forme de demi-produits : tôles, bandes, plats, profilés laminés de sections diverses, tubes, pièces forgées et pièces moulées.

Le chaudronnier met essentiellement en œuvre les produits plats (tôles laminées à chaud ou à froid) et des tubes avec ou sans soudure. Il utilise également comme composants de ses matériels : des pièces forgées (brides, plaques tubulaires), des pièces embouties (fonds bombés standards) et quelques types de profilés (servant de renforts ou de supports).

3.3. Normalisation. — À l'heure actuelle, tous ces produits font l'objet de normes de plus en plus nombreuses qui concernent soit uniquement leurs formes, dimensions et tolérances, soit leurs qualités (composition chimique, élaboration, caractéristiques mécaniques, état de livraison et conditions de réception). Cette dernière tendance se développe rapidement et les normes correspondantes concernent des demi-produits destinés à un domaine d'emploi particulier (par exemple : la norme NF A 36-206 donne les limites d'élasticité minimales garanties pour des températures de 200 à 450 °C).

4. CRITÈRES DE CHOIX

Ce sont les comportements physique et chimique du matériau, envisagés dans les conditions d'emploi prévues du matériel, qui constituent les principaux critères de choix. Son comportement vis-à-vis des procédés de fabrication

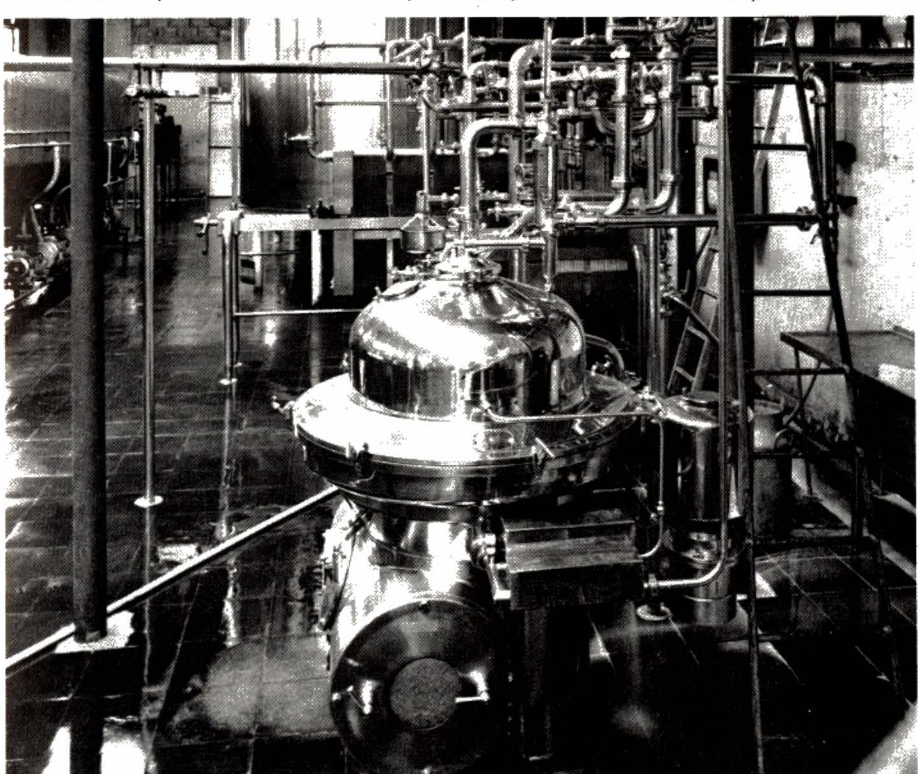


Fig. V-3

Application de l'emploi de l'acier inoxydable dans les industries pharmaceutiques (*B. Curé-Saminox)*

est un deuxième critère de choix (surtout son aptitude au soudage).

4.1. Comportement dans les conditions d'emploi

4.1.1. Température. — C'est essentiellement par rapport à la température que se fait le choix des matériaux.

● Températures ordinaires. — Ce sont les températures des matériels qui ne sont ni chauffés ni refroidis. Si l'ouvrage n'a aucune charge à supporter (capot, habillage de tôlerie), l'aptitude au formage guide seule le choix.

Si les charges appliquées ou la pression sont statiques, la contrainte maximale doit être inférieure à la contrainte admissible $R_p = R_e$ (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 2, § 4). Dans ce cas, on emploie soit des aciers E 26 ou A 42 P, soit des aciers à haute limite d'élasticité; ces derniers procurent un gain de masse et un gain de temps (volume des soudures réduit) mais ils sont plus chers et souvent plus difficiles à souder. Si les charges ou la pression sont périodiques, la contrainte maximale doit être inférieure à la résistance à la rupture par fatigue et une étude particulière de la forme des assemblages et du procédé de soudage est nécessaire.

Il faut toujours considérer le risque de rupture fragile: la résilience du matériau et les formes de l'appareil guident souvent le choix entre deux nuances possibles.

● Basses températures. — Seuls les alliages présentant une résilience suffisante à la température d'emploi sont utilisables. Jusqu'à — 20 °C, on peut employer la nuance A 42 FP. Jusqu'à — 180 °C, les aciers au nickel conviennent (la teneur en nickel est d'autant plus élevée que la température est plus basse). Au-dessous de — 180 °C (cryogénie), on utilise l'alliage A-G4 MC dont les caractéristiques mécaniques augmentent quand la température diminue et qui est exempt de fragilité. Les aciers inoxydables austénitiques conviennent quelle que soit la température d'utilisation.

● Températures élevées (de 120 à 400 °C). — La limite d'élasticité du matériau diminue régulièrement et la contrainte maximale doit être inférieure à la contrainte admissible calculée à partir de la limite d'élasticité de l'alliage à la température d'emploi. On emploie alors la nuance A 42 C.

● Hautes températures (au-dessus de 400 °C). — Dans ce domaine apparaît le phénomène du fluage (allongement progressif sous une charge constante). C'est la charge provoquant la rupture par fluage en 10^5 h (11 ans) qui doit être considérée pour déterminer la contrainte admissible.

De 400 à 500 °C, les aciers non alliés ne conviennent plus et il faut utiliser les aciers faiblement alliés résistant au fluage (par exemple: 15 CD 2.05).

Au-delà de 500 °C, on emploie des aciers inoxydables austénitiques résistant mécaniquement aux températures élevées. Ces aciers comportent une très faible addition de bore (0,0015 % comme par exemple : Z 6 CND 17.12 B ; NF A 35-580).

4.1.2. Corrosion. — Le comportement chimique d'un alliage en présence de produits corrosifs (acides, bases, etc.) doit être déterminé en laboratoire par des essais de longue durée reproduisant les conditions de température et de pression prévues. Les résultats (perte de masse, attaque intergranulaire) concernant des échantillons de natures différentes placés dans les mêmes conditions guide le choix du matériau qui convient le mieux.

Pour résoudre ces problèmes, on utilise les différents aciers inoxydables austénitiques, le titane et les alliages de nickel (dans les cas difficiles). Le prix de ces alliages conduit souvent à l'emploi de produits composites (tôles plaquées et doublages minces).

On est parfois obligé de faire appel à des revêtements non métalliques (peintures, plastiques, ébonite, émails).

4.2. Comportement en fabrication

4.2.1. Aptitude au soudage. — Pour les aciers, elle dépend essentiellement de leur pureté chimique (teneurs en soufre et en phosphore inférieures à 0,04 %) et elle varie en sens inverse de leur teneur en carbone qui ne doit pas dépasser 0,25 % pour éviter les zones fragiles au voisinage des soudures. Pour les aciers inoxydables, elle dépend de leur structure: les nuances austénitiques, les plus couramment employées en chaudronnerie, se soudent plus aisément que les nuances ferritiques ou martensitiques dont le soudage exige des précautions particulières.

Remarque : Le traitement de relaxation (effacement des tensions dues au soudage) peut souvent être supprimé par un préchauffage des éléments avant soudage. Le risque de transformation métallurgique au voisinage des soudures (zone trempée) est également réduit par le préchauffage (V. t. 3, Soudage).

4.2.2. Aptitude au formage. — Elle dépend de la capacité d'allongement permanent plastique de l'alliage qui varie en sens inverse du rapport $\frac{R_e}{R_r}$ (R_e: limite d'élasticité; R_r: résistance à la rupture par extension). L'essai de traction (V. t. 3, Résistance des matériaux, chap. 2) permet d'apprécier cette aptitude. En effet, l'allure du diagramme effort-déformation permet de classer les alliages en trois grandes catégories (fig. V-4) :

1° Matériaux caractérisés par la présence d'une limite d'élasticité marquée par un palier.

2° Matériaux à hautes caractéristiques.

3° Matériaux ne présentant pas de limite d'élasticité bien définie.

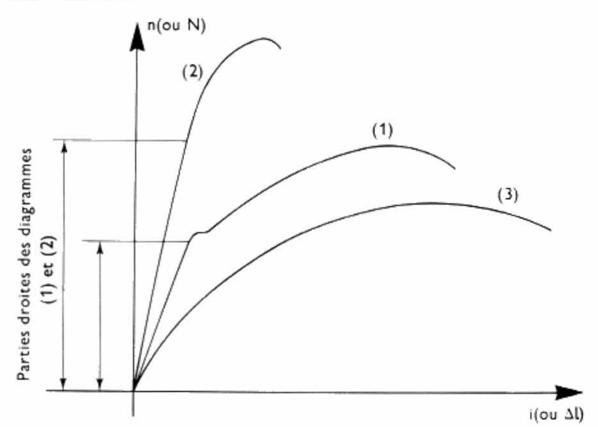


Fig. V-4 — Les trois allures du diagramme de traction des alliages métalliques

Les matériaux ductiles, très aptes au formage, ont un rapport $\frac{R_e}{R_r}$ inférieur à 0,7 et un diagramme du type (1) ou (3). Les matériaux à hautes caractéristiques mécaniques ont un rapport $\frac{R_e}{R_r}$ supérieur à 0,7 et sont difficiles à former (ils exigent un effort important pour dépasser la limite d'élasticité et leur capacité d'allongement est faible).

Pour les aciers, l'aptitude au soudage dépend essentiellement de leur pureté chimique (teneurs en soufre et en phosphore inférieures à 0,04 %) ; elle varie en sens inverse de leur teneur en carbone (qui ne doit pas dépasser 0,3 %) et donc de leur aptitude à la trempe.

Remarque 1 : Le risque de fragilisation dans les zones déformées plastiquement peut être réduit en pratiquant le formage à froid entre 150 et 200 °C.

Remarque 2 : L'allongement permanent de la fibre extérieure dans les opérations de formage à froid est souvent inférieur à 5 %. Si un allongement supérieur est nécessaire, le formage à froid doit être en général suivi d'un traitement de relaxation aux environs de 650 °C.

Remarque 3: Lors du formage à chaud, les risques de grossissement du grain et de fragilisation obligent souvent à limiter la température pour cette opération.

TRAVAIL DES TÔLES

Le passage de la forme commerciale (feuille de tôle de 1 m × 2 m, par exemple) à la pièce composante d'un appareil chaudronné prête à l'assemblage se fait par une suite d'opérations :

— *le traçage* délimite la surface développée de la pièce en marquant son contour ;

— *le découpage* détache cette surface du reste de la feuille ;

— *le formage* (*pliage* ou *roulage*) donne enfin sa forme géométrique finale à la pièce.

5. TRAÇAGE

Pour déterminer le contour le traceur dispose des dessins, établis par le bureau d'études, qui définissent les formes et dimensions de l'ouvrage tel qu'il devra se présenter après achèvement de sa fabrication. Connaissant le résultat à obtenir, le traceur doit donc rechercher les dimensions initiales de la matière à mettre en œuvre avant découpage en tenant compte des opérations ultérieures de formage et d'assemblage. Il doit également prévoir les gabarits de vérification des angles et des formes à réaliser.

Les éléments que le dessin n'indique pas sont déterminés graphiquement en réalisant une épure ou par le calcul à partir d'un simple croquis. Ce sont :

— les contours des surfaces développables (cylindres, cônes et leurs combinaisons) ;

— les contours des flans des surfaces non développables (éléments de sphères, tores, fonds bombés) ;

— les intersections (tubulures et leurs ouvertures).

Les outils du traceur sont la pointe à tracer, le compas à pointes, le règle et l'équerre. Les courbes sinueuses sont tracées à l'aide de réglettes souples, cintrées par déformation élastique et maintenues par des poids sur la tôle à tracer.

Travaux unitaires et petites séries : pour une pièce unique, le tracé du développement est exécuté directement sur la tôle à former.

Lorsque plusieurs pièces identiques (ou symétriques) doivent être tracées, la première qui est découpée sert de gabarit et est reproduite autant de fois qu'il est nécessaire.

Traçage au gabarit : les sources d'erreur sont limitées, et les temps nettement diminués, en faisant appel au traçage d'après des gabarits. Réalisés en tôle mince, ils offrent, en outre, l'avantage d'être plus facilement manipulables que les tôles à tracer. La reproduction consiste à suivre le contour du gabarit immobilisé sur la tôle. Les gabarits marqués au moyen de lettres et de chiffres, sont répertoriés et conservés. Ils sont souvent accompagnés de calibres de vérification pour la mise en forme.

Suppression du traçage : le traçage en vue du découpage à plat peut être évité par l'emploi de butées ou de dispositifs de guidage. Il est inutile pour les machines d'oxycoupage ou de découpage au plasma équipées de têtes de lecture permettant de suivre un dessin.

6. DÉCOUPAGE

De nombreux procédés sont utilisés :

— *Enlèvement de copeaux :* le sciage à la scie circulaire ou à ruban exige une lubrification pour les aciers. Il est surtout réservé aux alliages d'aluminium qui se coupent à sec (V. t. 3, Usinage, chap. 2).

— *Fusion :* quelques millimètres de matière au-delà du tracé sont fondus par oxycoupage ou par coupe thermique (chalumeau à plasma, bombardement électronique). Ce procédé est très employé pour découper le contour de pièces épaisses qui seront ensuite soudées (V. t. 3, Découpage).

— *Cisaillage :* la séparation de la surface de la pièce du reste de la feuille est obtenue en provoquant une rupture par cisaillement de la tôle sur le tracé (comme on coupe du papier avec des ciseaux). Ce procédé est le plus utilisé en chaudronnerie pour les tôles d'épaisseur inférieure à 12 mm (certaines cisailles coupent des épaisseurs très supérieures).

6.1. Cisailles guillotines

6.1.1. Principe de fonctionnement. — Il existe de nombreux modèles de cisailles du type dit « à guillotine » (fig. V-5 et V-6) comportant une lame inférieure horizontale fixe et une lame supérieure montée sur un coulisseau mobile guidé verticalement et actionné mécaniquement ou hydrauliquement tandis que la tôle à cisailler est maintenue sur la table par un presse-tôle (V. fig. V-8).

La lame mobile, inclinée d'un angle α, coupe la tôle en descendant et la coupe se fait donc d'une manière progressive d'un bout à l'autre de la feuille (fig. V-7).

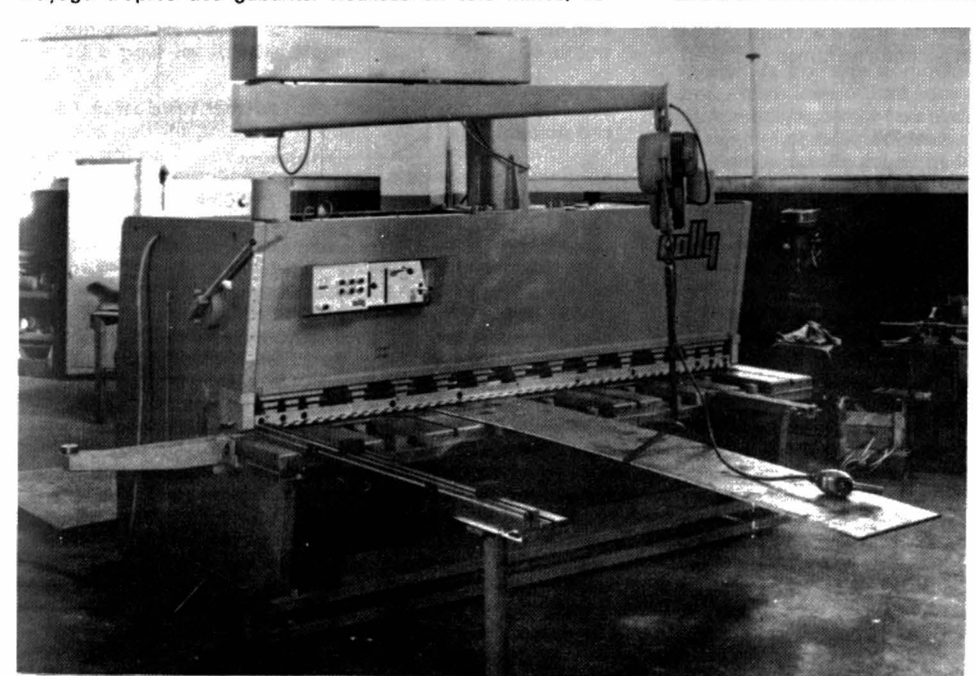


Fig. V-5

Cisaille-guillotine à presse-tôle par vérins hydrauliques (*Colly*)

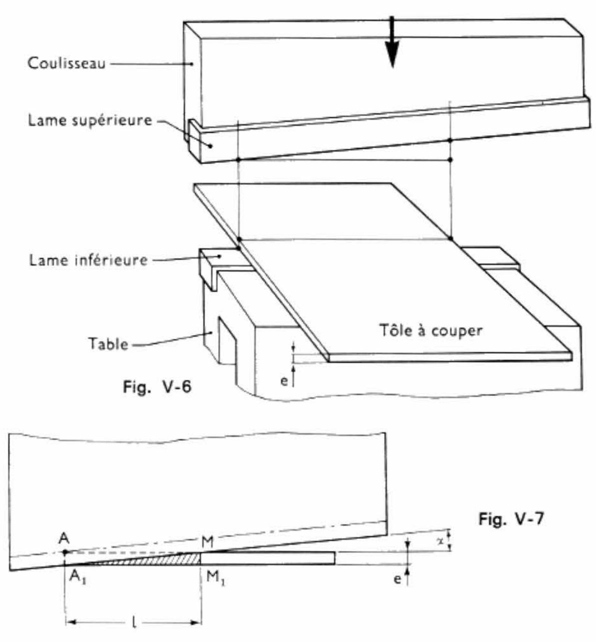


Fig. V-6

Fig. V-7

6.1.2. Efforts mis en jeu. Influence sur la coupe. — Une force verticale $\vec{P}$, dirigée vers le haut est exercée par la tôle sur la lame supérieure. De même une force $-\vec{P}$, dirigée vers le bas, est exercée par la tôle sur la lame inférieure. Ces forces provoquent un couple de torsion d'autant plus important que le jeu entre les lames est plus grand. Des forces horizontales $\vec{H}$ et $-\vec{H}$ tendent à écarter les lames l'une de l'autre. Les résultantes de ces forces et couples tendent à écarter le coulisseau mobile de la table et à créer une courbure de la lame mobile qui affecte la qualité de la coupe par augmentation du jeu.

L'effort maximal de coupe pour une cisaille à lame inclinée correspond, en première approximation, au cisaillement du triangle A_1M_1M (fig. V-7).

Pour les tôles épaisses ($e \geqslant 6$ mm), α est en général voisin de 3° ; R_t étant la résistance du métal à la traction, sa résistance au cisaillement est $R_g \approx 0{,}8\ R_t$ et l'effort de coupe théorique vaut : $P = 0{,}8\ R_t . 10\ e^2 = 8\ e^2 . R_t$.

Pour les tôles minces, α diminue et est voisin de 1°.

6.1.3. Jeu entre les lames. Écrouissage de la coupe. — Suivant l'épaisseur e de la tôle à couper, il est nécessaire de laisser un certain jeu entre les lames (fig. V-8).

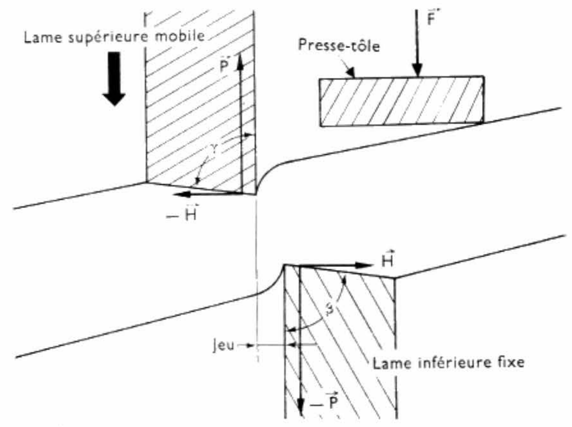


Fig. V-8
Efforts sur les lames et presse-tôle

Les points d'applications des efforts de cisaillement P tendent à se décaler par rapport au plan de coupe et la tôle tend à basculer

Celui-ci est de l'ordre de 0,06 e (il est donc pratiquement nul pour les tôles minces). Il s'ensuit que ce jeu doit être réglable en fonction de l'épaisseur des pièces à couper.

Le jeu provoque un couple qui tend à soulever la feuille : il est donc indispensable que la tôle soit serrée très énergiquement sur la table. Cela explique la présence de presse-tôle qui doivent bloquer la tôle avant la coupe et qui l'empêchent de se déplacer au début de l'opération (action horizontale des lames sur la tôle).

L'expérience montre que, dans la coupe, le métal présente une première zone très brillante qui est écrouie et le reste semble cassé (fig. V-9). Pour limiter cette zone la coupe nécessite un mouvement rapide de la lame, en particulier

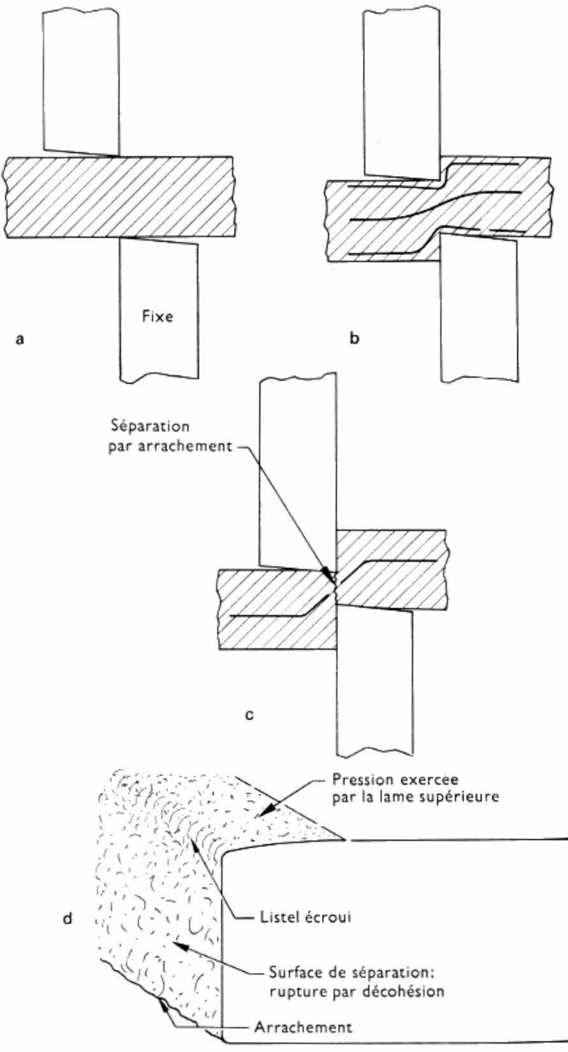


Fig. V-9 — Cisaille guillotine : mode d'action des lames

a) Les deux lames de la cisaille pénètrent en même temps dans le métal, en le comprimant, dans un premier temps, à l'endroit du découpage.

b) Début de déplacement relatif sous l'action de l'effort appliqué. Les deux sections glissent parallèlement, l'une par rapport à l'autre et les fibres moyennes subissent un allongement important.

c) Lorsque la capacité de déformation plastique des fibres moyennes est dépassée, la rupture se produit, brutalement, par décohésion.

d) Aspect de la coupe obtenue.

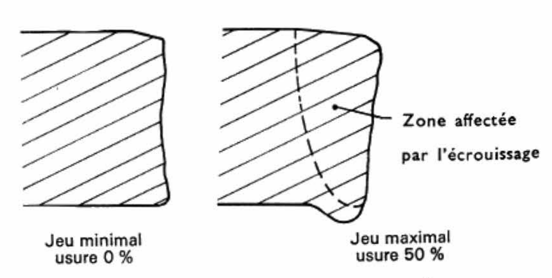


Fig. V-10 — Influence de l'usure et du jeu des lames

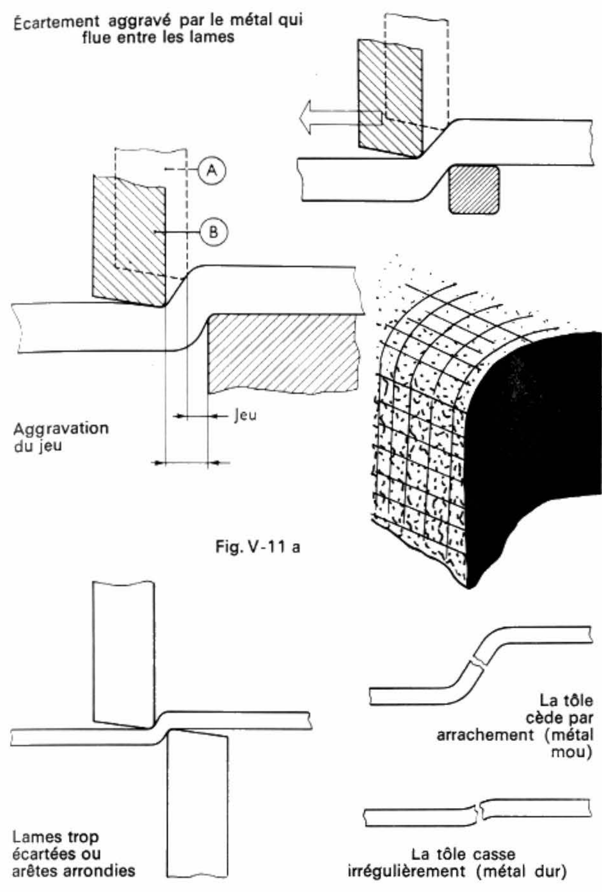


Fig. V-11 a

Fig. V-11 b

pour les aciers inoxydables. Ce phénomène d'écrouissage est d'autant plus important que le jeu et l'usure des lames sont plus accentués (fig. V-10). Si le jeu ou l'usure sont exagérés, la coupe est inacceptable (fig. V-11 a) ou même rompue (fig. V-11 b).

6.1.4. Déformation des bandes cisaillées. — Il y a gauchissement ou *vrillage* si la bande coupée est de faible largeur (par exemple 6 à 8 *e*) et cambrure ou *arcage* ou flexion dans les autres cas (celle-ci est négligeable au-delà de 10 *e* pour les tôles moyennes dont l'épaisseur atteint 10 mm).

6.1.5. Robustesse et puissance des cisailles. — Les cisailles doivent présenter le minimum de déformation des parties utiles.

L'effort de cisaillage étant proportionnel au carré de l'épaisseur de la tôle, pour chaque machine est définie une épaisseur maximale à ne pas dépasser si l'on veut éviter les surcharges. Il y a intérêt à disposer d'une machine à coupe rapide, donc puissante, qui influence favorablement la qualité des surfaces de séparation (V. ci-dessus). De plus, à faible vitesse, la tôle a le temps de se plier vers le bas, sous l'effet de son propre poids, avant l'achèvement de la coupe (alors, la dernière partie n'est pas coupée à angle droit). À grande vitesse, la tôle n'a pas le temps de retomber et l'on obtient une coupe propre et d'équerre sur toute la longueur de la surface de séparation.

L'utilisation de plus en plus importante de tôles fortes a conduit les constructeurs à réaliser des machines très robustes et comportant de nombreux perfectionnements qui assurent la sécurité du personnel et du matériel dans une très large gamme de capacités : longueur de coupe de 1 à 6 mètres pour des épaisseurs *e* pouvant atteindre 40 mm. Les utilisateurs exigent de ces machines modernes un haut niveau de qualité et de précision de coupe, associé à une grande rapidité (en particulier dans les travaux de série), ainsi qu'une grande facilité d'entretien et de réglage.

Mais les temps de coupe n'entrent que pour une faible part dans l'opération de cisaillage et les améliorations apportées aux machines seraient insuffisantes si elles n'étaient accompagnées d'un aménagement rationnel du poste de travail (V. § 6.1.6) et d'une étude de l'implantation des postes précédant et suivant le cisaillage.

Autres qualités requises par les utilisateurs. — Parmi les autres qualités cherchées on peut citer :

— La possiblité de couper en butée, de couper suivant un tracé, de couper à l'équerre ;
— La possibilité de reprise pour les tôles de grande largeur et de grugeage.
— La facilité de démontage des lames pour affûtage.
— L'accessibilité des organes de commande, en évitant toutefois qu'ils puissent être détériorés pendant la mise en place des tôles sur la table.
— La possibilité de réaliser plusieurs affûtages des lames.

Toutes les cisailles modernes possèdent une butée arrière : réglable depuis la place de l'opérateur, elle permet d'afficher la largeur de la bande à couper. La butée avant est également indispensable. Toutes les cisailles guillotines possèdent une protection des lames de coupe, conformément aux règles de sécurité .

Les différents constructeurs proposent d'autres accessoires, tels que : système d'éclairage du tracé, règles d'équerre graduées, accessoires de coupe d'angle ou de grugeage et prolonges de support (pour les tôles de grandes dimensions).

Lames de cisailles. — Elles sont, en général, en acier allié à 13 % de chrome, trempé et soigneusement rectifié. La section d'une lame peut être un trapèze, un parallélogramme ou un rectangle. Dans ce dernier cas, les quatre faces peuvent être utilisées successivement. Les lames inférieures, à deux ou quatre coupes sont à 90° (V. fig. V-8 :β). Les lames supérieures, à une ou deux coupes, à 85° (V. fig. V-8 :γ).

Ces lames sont fixées par des systèmes qui doivent être suffisamment énergiques pour que cette fixation soit efficace, tout en permettant un démontage pratique (changement de lame), et un calage rapide (emploi d'une lame réaffûtée). Les constructeurs s'étant rendu compte de l'importance, d'une part, du jeu entre les lames et, d'autre part, de l'angle d'inclinaison de la lame en fonction de l'épaisseur de la tôle, ont muni leurs cisailles de systèmes de réglage permettant d'ajuster ces deux grandeurs.

Commande des cisailles. — La commande mécanique réservée aux tôles de petites épaisseurs ($e \leqslant 6$ mm), comporte un gros volant qui emmagasine de l'énergie cinétique. Un embrayage lie ce volant à un embiellage ; l'énergie libérée brutalement permet d'obtenir une coupe rapide qui évite l'écrouissage du métal. Les machines modernes ont une commande hydraulique, le coulisseau porte-lame descendant sous l'action de deux vérins conjugués mécaniquement ou hydrauliquement. Pour augmenter la rapidité et éviter l'écrouissage, quelques machines comportent un accumulateur hydraulique sur le circuit de coupe.

6.1.6. Méthode de travail

1° *Mise en place de la tôle.* — Dans le cas de tôles transportables à la main, l'ouvrier met lui-même la tôle sur la table de la machine. Dans le cas de tôles lourdes ou de grandes dimensions, il est indispensable que la manutention soit faite avec un moyen de levage (pont roulant, potence). La tôle est prise à l'aide de crampons, ou mieux de pinces

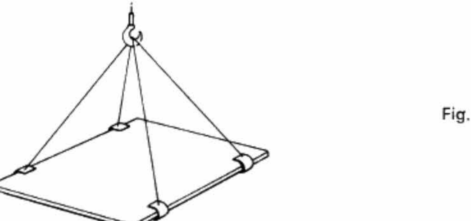


Fig. V-12

indesserrables, reliés à des chaînes elles-mêmes accrochées au pont ou à la potence (fig. V-12). Ce procédé est lent, la mise en place des crampons ou pinces étant délicate. Les ateliers modernes possèdent des systèmes de préhension de

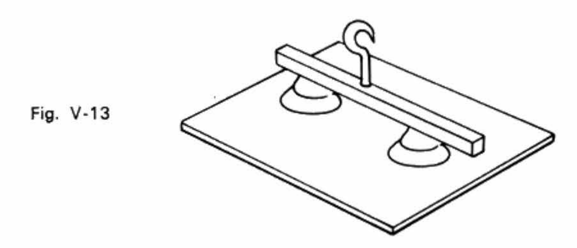


Fig. V-13

la tôle qui sont soit magnétiques, soit à vide. Les électro-aimants ne permettent que la préhension des aciers ou métaux magnétiques ; les ventouses à vide sont utilisables avec tous les métaux (fig. V-13) mais la tôle à soulever doit être propre.

La tôle est alors présentée devant la cisaille (fig. V-14). Il faut en général deux ouvriers, l'un pour manœuvrer le

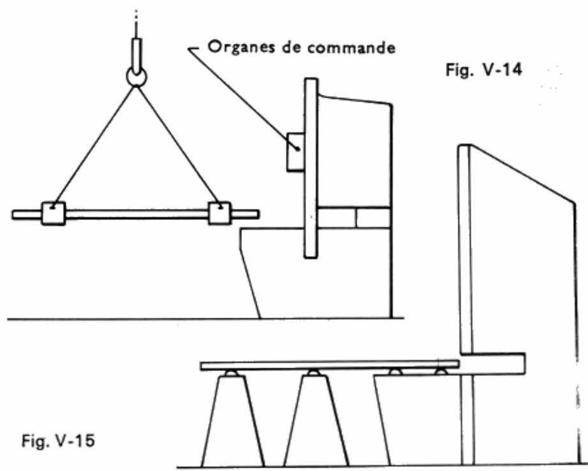


Fig. V-14

Fig. V-15

pont ou la potence, l'autre pour commander la manœuvre et guider la tôle. Ce dernier doit porter des gants spéciaux anticoupures.

La table support de tôle doit être suffisamment large pour bien supporter la tôle. L'adjonction de supports de manutention à billes facilite la mise en place de la feuille à couper, surtout si celle-ci est de grandes dimensions (fig. V-15).

2° *Coupe sans traçage.* — Elle s'utilise lorsque la tôle doit être coupée rectangulairement soit à des cotes indiquées soit en bandes de largeur constante.

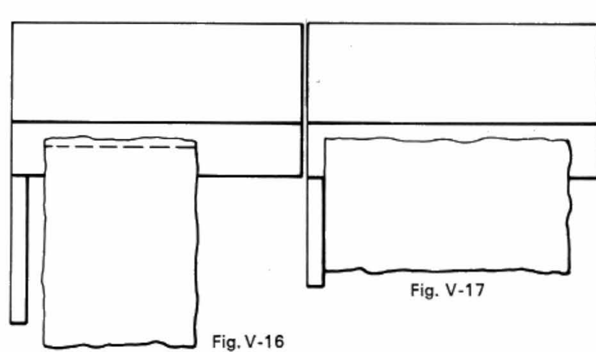


Fig. V-16

Fig. V-17

La première opération est la mise d'équerre de la tôle, la cisaille étant réglée pour couper au minimum. Il est préférable de commencer par couper suivant la largeur (fig. V-16). Ensuite la tôle est tournée de 90° et la coupe « fraîche » est appuyée sur le guide latéral. La tôle est alors coupée au minimum suivant la longueur (fig. V-17). Sur les cisailles modernes un trait lumineux facilite ce réglage. Le réglage de la coupe aux dimensions désirées se fait ensuite en se servant soit de la butée arrière, soit de la butée avant, soit de la règle graduée du guide latéral. Pour le découpage de bandes de même largeur, la butée arrière est placée pour obtenir cette largeur et la cisaille peut être réglée en automatique si le nombre de bandes à couper est suffisamment grand. Pour le découpage d'un rectangle (ou d'un carré), il est préférable de se servir de la butée avant ou de la graduation du guide latéral, en tournant la tôle pour cisailler les quatre côtés.

Une coupe oblique est réalisable lorsque la machine est munie d'une butée avant orientable avec secteur gradué. Dans ce cas, il est nécessaire de régler soigneusement cette butée et de tenir compte de l'obliquité de la tôle qui limite la largeur susceptible d'être cisaillée (fig. V-18).

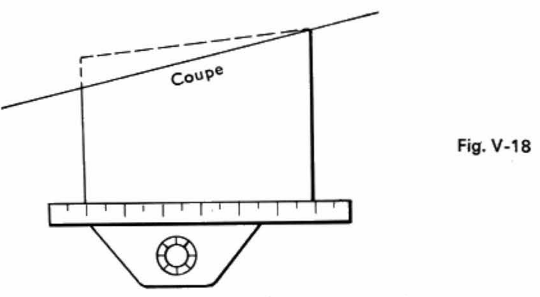


Fig. V-18

3° *Coupe suivant tracé.* — Il est toujours préférable d'éviter le traçage qui augmente le prix de revient. Cependant, très souvent le but recherché est de diminuer les chutes et le traceur imbrique les pièces.

Après mise en place sur la table de la machine, la tôle est avancée sous les presse-tôle pour que le tracé coïncide avec la ligne lumineuse correspondant à la coupe. On peut être conduit à cisailler des tôles dont la longueur dépasse la longueur de coupe de la machine : ce travail ne peut être effectué que si la partie à couper est d'une largeur inférieure au col de cygne de la cisaille.

La reprise se fait en utilisant soit la butée arrière si la cisaille possède une lame de grugeage qui coupe le copeau de la première coupe, soit des butées spéciales dont sont munies de nombreuses cisailles modernes.

4° *Cisaille chanfreineuse.* — Cette cisaille permet de réaliser le chanfrein de soudure sans autre manutention de la tôle.

Dans ce modèle de machine à table inclinable, la tôle étant en place pour la coupe droite, l'ouvrier a la possibilité de régler la dimension du chanfrein ; cela permet la réalisation soit d'un seul chanfrein, sur toute l'épaisseur de la tôle ou sur une partie (avec talon), soit d'un chanfrein double, avec ou sans talon, mais en retournant la tôle (fig. V-19). Après avoir réglé le chanfrein, l'ouvrier affiche

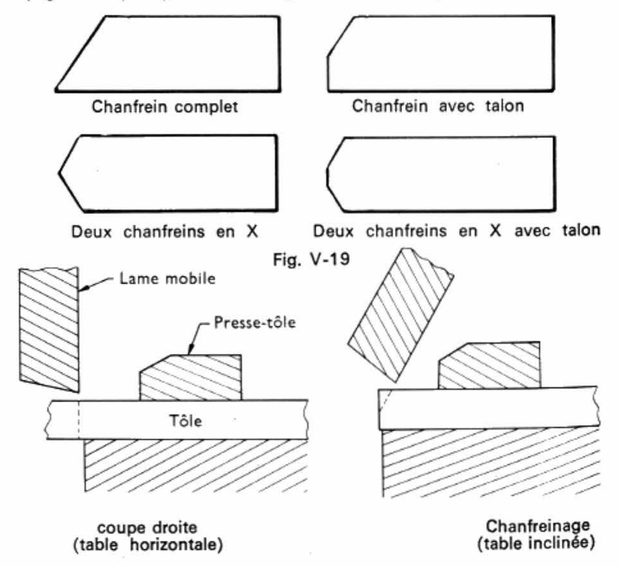


Fig. V-19

Fig. V-20 — Cisaille chanfreineuse

coupe et chanfrein : les deux coupes sont faites l'une après l'autre sans desserrage des presse-tôle, le basculement de la table entre les deux opérations étant automatique (fig.

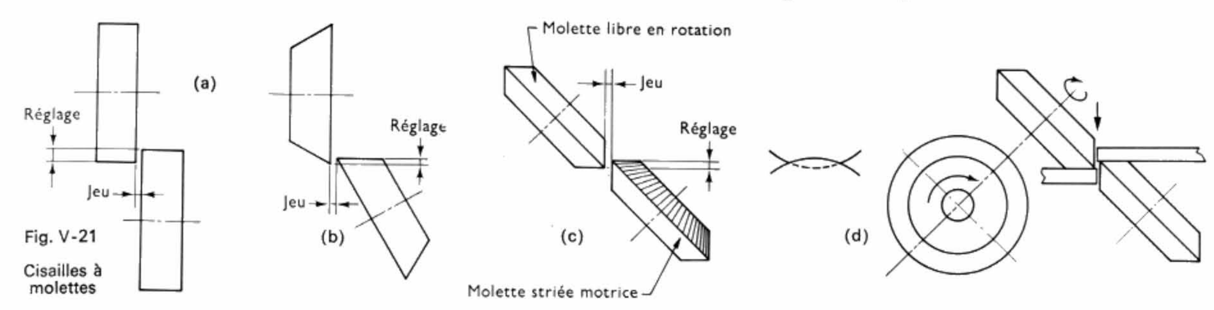


Fig. V-21
Cisailles à molettes

V-20). Cette machine supprime des manutentions mais les chanfreins sont à 30°.

6.2. Machines de tôlerie

6.2.1. Cisailles à molettes (fig. V-21). — Les organes de coupe de ces machines sont constitués de deux outils de section circulaire qui, dans leur mouvement de rotation en sens inverses, entraînent la tôle par frottement et provoquent son cisaillement (fig. V-21 a et b). Ces outils, appelés molettes, présentent une partie active de forme cylindrique, conique ou biconique et sont portés par des axes dont la position diffère selon les types de machines. Un dispositif permet de régler la distance de deux arêtes en fonction de l'épaisseur et de la nature du métal.

La tôle entre en contact avec les molettes sur une faible surface ; cela permet le découpage suivant des tracés courbes ou sinueux, sur tôles planes ou déjà formées. La tôle ne peut être entraînée si son épaisseur est trop grande vis-à-vis du rayon des molettes : l'emploi d'une molette striée motrice (fig. V-21 c) augmente le frottement mais marque la tôle et cela constitue un inconvénient si ces stries sont sur la partie conservée.

Les machines à col de cygne comportent un centrage réglable pour l'exécution de flans circulaires non tracés. Les flans de grand rayon, préalablement découpés en octogone, sont maintenus en position par un centrage placé à l'extérieur de la machine sur un bâti spécial ou prolongateur (fig. V-21).

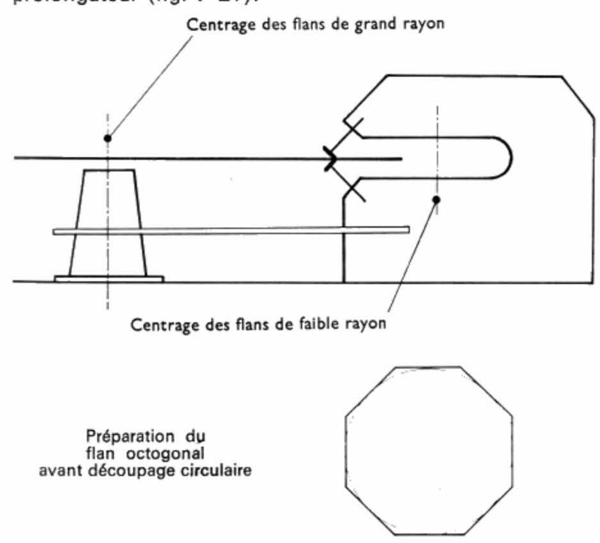


Fig. V-22 — Machine à col de cygne

6.2.2. Cisailles à mouvement alternatif et machines universelles de tôlerie. — Ces machines sont caractérisées par le mode d'action de leur outil qui est animé d'un mouvement alternatif rapide et de faible amplitude. Certaines doivent leur dénomination de machines universelles à leurs possibilités d'exécuter, outre le découpage par cisaillage, diverses opérations de détourage et de formage à l'aide d'outils appropriés, aisément interchangeables.

Une évolution récente s'est manifestée sur deux plans différents : augmentation de puissance permettant le travail de tôles épaisses (jusqu'à 10 mm) et apparition de machines à commande numérique simple ou programmée.

1° *Découpage par cisaillage.* — Les lames, très courtes, ont une largeur *l* de 10 à 30 millimètres et la fréquence du mouvement est comprise entre 400 et 4 000 coups par minute. Seule, la lame supérieure est mobile (fig. V-23). Un dispositif permet, en modifiant la position de sa course,

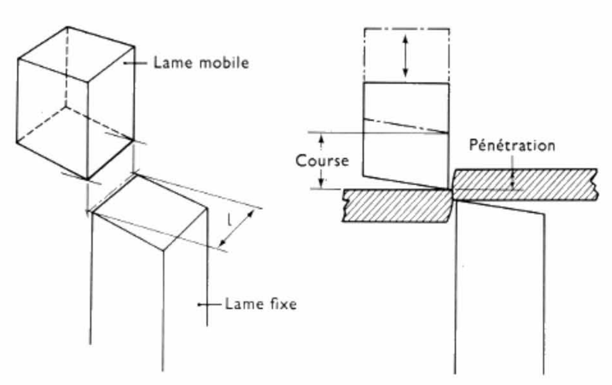


Fig. V-23 — Cisaille à lames courtes vibrantes (mode d'action des outils)

de régler sa pénétration dans la tôle. En effet, cette pénétration doit être suffisante pour obtenir la rupture sous les lames (V. fig. V-9 c), mais elle doit être limitée pour ne pas entraîner de rupture non guidée à l'extérieur des lames.

Le découpage suivant un tracé rectiligne ou sinueux peut être réalisé en guidant la tôle à la main lorsque son épaisseur et ses dimensions l'autorisent. Le découpage sans tracé peut être réalisé à l'aide de guides ou de gabarits : les disques sont découpés à l'aide de guides circulaires ou sont centrés sur un axe réglable disposé dans le col de cygne, ou à l'intérieur de la machine lorsque le rayon est trop important. Les disques sont alors prédécoupés suivant un contour polygonal circonscrit ; le cas échéant, ils sont soutenus par des chemins de billes.

2° *Machines universelles de tôlerie*

a) *Grignotage.* — Le grignotage fait appel à une technique différente qui consiste à exécuter une succession de découpages à l'aide d'un poinçon cylindrique qui permet d'enlever, à chaque coup, une chute de métal en forme de croissant (fig. V-24). La tôle prend appui sur la matrice associée au poinçon qui ne coupe que d'un seul côté ; son autre extrémité, formant pilote, reste constamment engagée dans l'ouverture de la matrice et maintient la tôle lorsqu'on

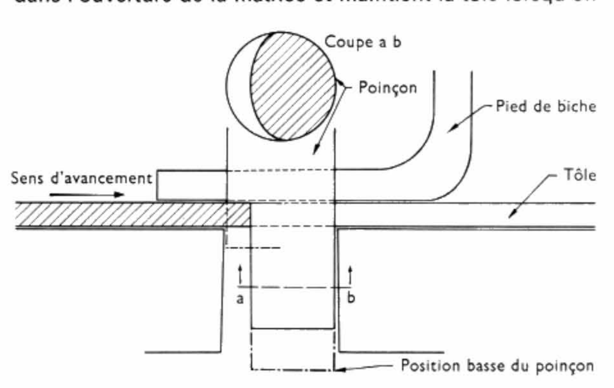


Fig. V-24 — Principe du grignotage à poinçon

exécute un découpage suivant tracé. Si le découpage doit être fait en pleine tôle (au lieu de partir d'un bord), il est nécessaire de percer un trou de départ permettant d'engager le poinçon.

Il est aussi possible d'utiliser un poinçon coupant sur tout son pourtour (brevet Trumph). Il en existe deux variantes avec pilote effaçable : celui-ci rentre soit dans le poinçon lui-même, soit dans la matrice. Ces dispositions permettent le découpage d'ouvertures en pleine tôle sans exiger le perçage d'un trou de départ (fig. V-25).

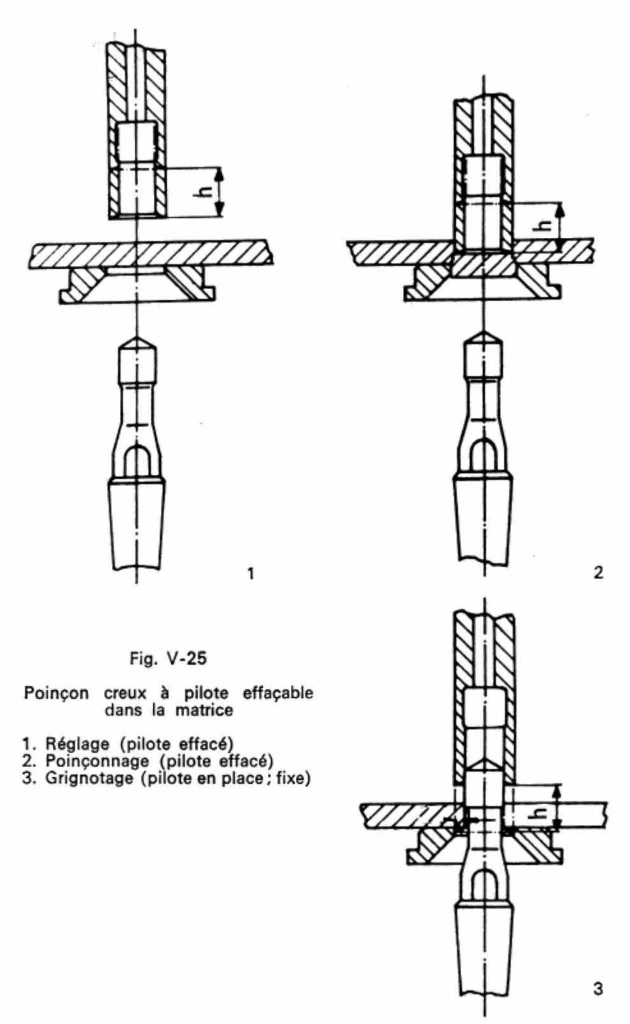


Fig. V-25

Poinçon creux à pilote effaçable dans la matrice

1. Réglage (pilote effacé)
2. Poinçonnage (pilote effacé)
3. Grignotage (pilote en place ; fixe)

Une grignoteuse portative permet de chanfreiner les bords de tôles à souder (fig. V-26).

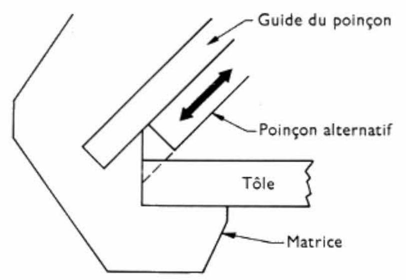


Fig. V-26 — Principe d'une grignoteuse portative à chanfreiner (capacité 8 mm)

b) *Grugeage*. — Le grugeage consiste à découper des encoches ou des entailles de forme rectangulaire ou en vé. On utilise pour cela un outil de grignotage modifié : des dégagements réduisent sa partie active à une section rectangulaire (fig. V-27). Cet outil permet le découpage des profilés.

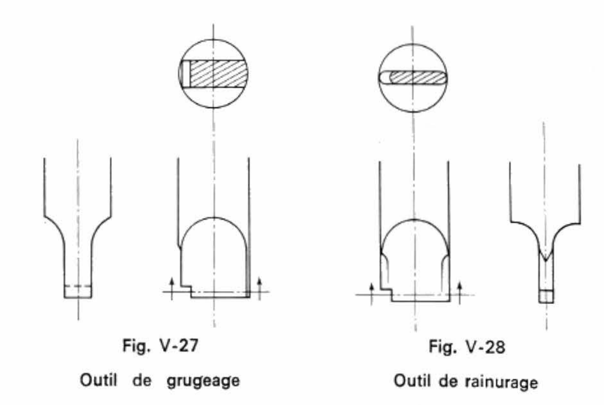


Fig. V-27 Outil de grugeage

Fig. V-28 Outil de rainurage

c) *Rainurage*. — L'exécution des rainures de petite largeur fait appel à un outil étroit (fig. V-28) que l'on utilise conjointement avec un pied de biche, pour maintenir la tôle, et avec un dispositif de guidage permettant d'obtenir des rainures rectilignes. Une variante de cet outillage permet l'exécution de volets d'aération (persiennage).

d) *Nervurage, soyage, profilage, cintrage des bords*. De nombreux outils de formage (poinçon et matrice de formes complémentaires), qu'il est possible de monter sans difficulté sur les machines universelles, permettent l'exécution de panneaux de toutes sortes, auxquels nervures et soyages apportent de la rigidité. Des profils particuliers peuvent être réalisés sur toutes pièces de tôlerie soit à l'aide d'outils livrés par le constructeur de machines, soit avec des outils confectionnés par l'utilisateur lui-même (exemple : outillage de soyage ; fig. V-29).

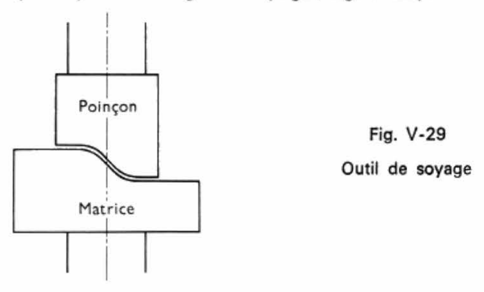


Fig. V-29

Outil de soyage

e) *Fonds bombés*. — Un outillage spécial comportant un poinçon convexe et une matrice creuse peut également être utilisé pour confectionner des petits fonds bombés (fig. V-30). Leur exécution s'apparente au travail

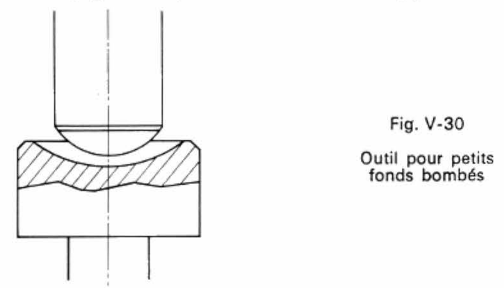


Fig. V-30

Outil pour petits fonds bombés

réalisé manuellement au marteau, mais la mise en jeu d'une puissance mécanique plus grande et la rapidité des coups offrent de meilleures conditions de fabrication.

6.2.3. Machines spéciales

1° *Travail par copiage ou en coordonnées*. — Pour l'exécution de séries importantes, on utilise des grignoteuses équipées d'un dispositif de copiage de gabarit. La feuille de tôle (fixée au guide transversal par des pinces, ce guide coulissant par ailleurs dans le chariot longitudinal) est mobile dans toutes les directions et se trouve guidée par un palpeur solidaire du guide transversal (fig. V-31). Avec un poinçon de grignotage carré on peut obtenir des découpes rectangulaires à angles vifs. L'emploi d'outils de poinçonnage (le périmètre de l'ouverture poinçonnée étant limité par la puissance de la machine) permet, soit un

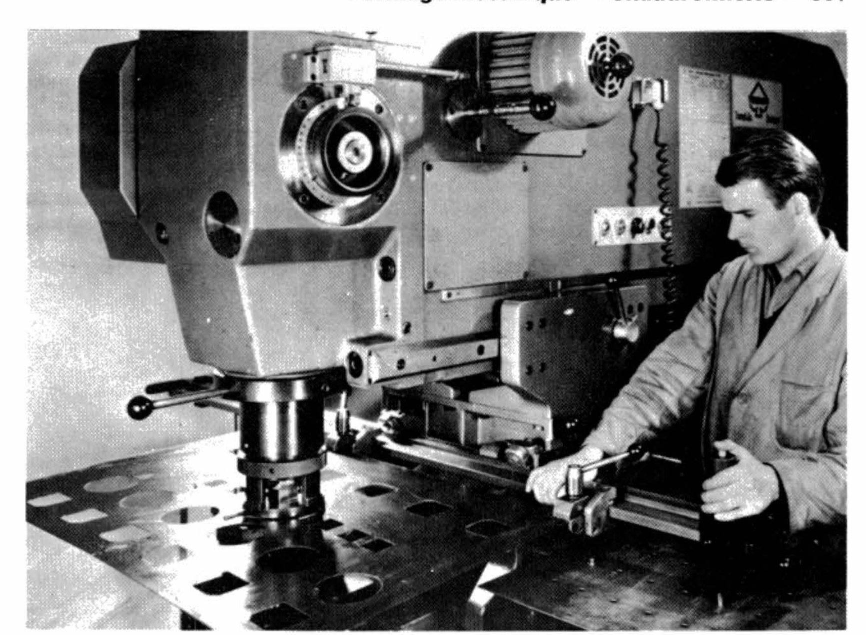


Fig. V-31

Poinçonneuse-grignoteuse (*Trumph*)

important gain de temps pour l'exécution de découpes identiques sur une même pièce, soit la réalisation de fentes de largeur inférieure au diamètre du poinçon de grignotage (positionnement par trous-repères dans le gabarit).

De plus, des règles graduées permettent de repérer les positions du guide transversal et du chariot longitudinal : en bloquant successivement le guide et le chariot, on peut aussi travailler en coordonnées pour l'exécution de découpes rectangulaires sur des pièces unitaires. L'exécution des découpes circulaires se fait alors à l'aide d'un bras pivotant fixé sur le porte-gabarit et guidant le palpeur.

2° *Automates à commande numérique.* — De tels automates ont été réalisés pour l'exécution de très grandes séries. Ainsi les tôles d'induits des moteurs coniques (moteurs-freins) sont exécutées sur une machine-transfert à six postes :

— Poste 1 : alimentation des flans circulaires.
— Poste 2 : encochage des tôles du stator.
— Poste 3 : séparation des tôles du stator par cisaillage curviligne.
— Poste 4 : empilage des tôles du stator et mesure de la pile.
— Poste 5 : encochage des tôles du rotor.
— Poste 6 : empilage des tôles du rotor.

La mesure de la hauteur de la pile au poste 4 commande le déplacement en diamètre des outils des postes 2, 3 et 5 : ainsi la conicité obtenue est indépendante des variations d'épaisseur des tôles. Cette mesure arrête aussi le chargement quand l'empilage atteint la hauteur voulue.

3° *Formage des fonds par tombage des bords.* — Dans ces machines (fig. V-32), un pivot *A* (sur lequel on fixe le flan, plat ou bombé) est réglé en position par le chariot *B*. Un galet de carre *C*, correspondant au rayon de carre à exécuter, tourne à une vitesse d'autant plus faible que l'épaisseur du fond est plus forte. Un galet formeur *D*, déplacé par un dispositif hydraulique, tombe progressivement le bord sur le galet de carre. Le galet pousseur *E* plaque le flan sur le galet de carre et assure sa rotation.

4° *Machine de formage universelle.* — Cette machine réalise des rétreints (ou des allongements) localisés. L'outil (fig. V-33) comporte des lames d'acier inclinées, noyées dans du caoutchouc vulcanisé ; elles rapprochent

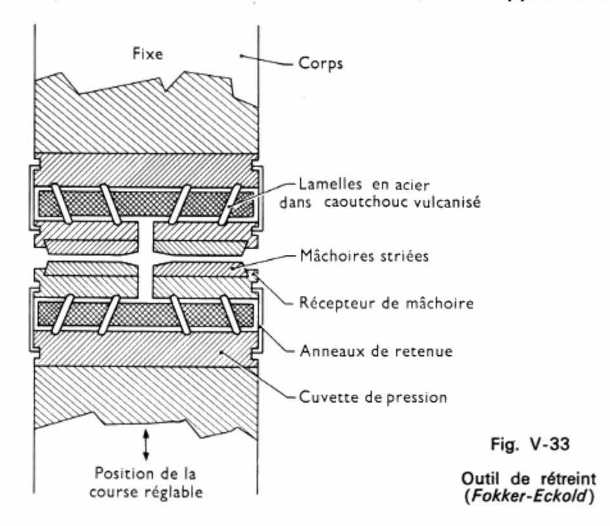


Fig. V-33

Outil de rétreint (*Fokker-Eckold*)

(ou éloignent, suivant leur sens d'inclinaison) les mâchoires dont la pression sur la tôle est constamment ajustable par réglage de la position de la course du mouvement alternatif de l'outil inférieur. Il est possible de réaliser rapidement des pièces unitaires de forme non développable.

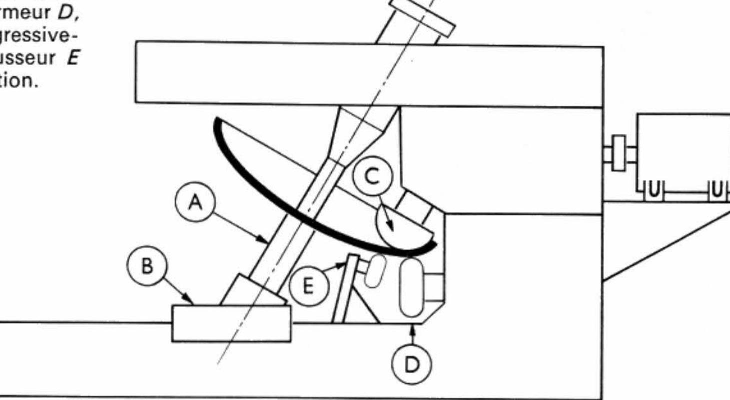


Fig. V-32

Machine à former les fonds par tombage des bords

7. PLIAGE

La pliage d'une tôle consiste en la réalisation d'une déformation permanente, rectiligne, caractérisée par un rayon de courbure et par un angle constants sur toute la longueur du pli (fig. V-34). L'opération peut être exécutée soit sur des plieuses où la tôle, immobilisée en position horizontale, est pliée par un volet pivotant autour d'un axe (fig. V-35) soit sur des presses-plieuses où la tôle est fléchie entre appuis par un poinçon à déplacement vertical (fig. V-36).

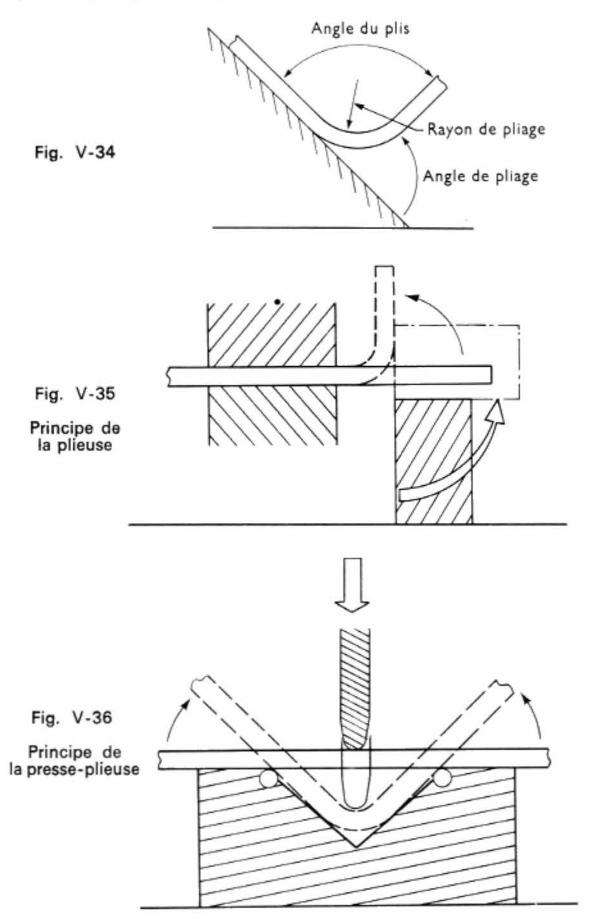


Fig. V-34

Fig. V-35

Principe de la plieuse

Fig. V-36

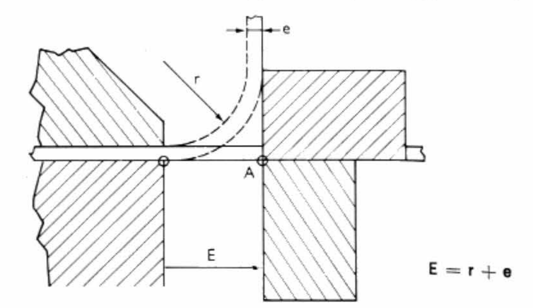
Principe de la presse-plieuse

7.1. Caractéristiques du pli. — Ces caractéristiques, rayon de courbure et angle, dépendent essentiellement de l'épaisseur de la tôle, des caractéristiques mécaniques du métal et du retour élastique après pliage. Le pli étant obtenu par une déformation permanente de flexion, le métal présente, sur l'extrados du pli, un allongement permanent d'autant plus important que le rapport entre le rayon intérieur et l'épaisseur de la tôle est plus faible. Le rayon intérieur de pliage minimal que l'on peut obtenir, sans risque de rupture ou de criques, est essentiellement fonction des caractéristiques mécaniques du métal. Les aciers doux, les aciers inoxydables, l'aluminium et le cuivre, à l'état recuit, admettent un rayon de pliage de l'ordre de l'épaisseur de la tôle. Les mêmes métaux, à l'état écroui ou durci par traitement, exigent un rayon au moins égal à trois ou quatre fois cette épaisseur.

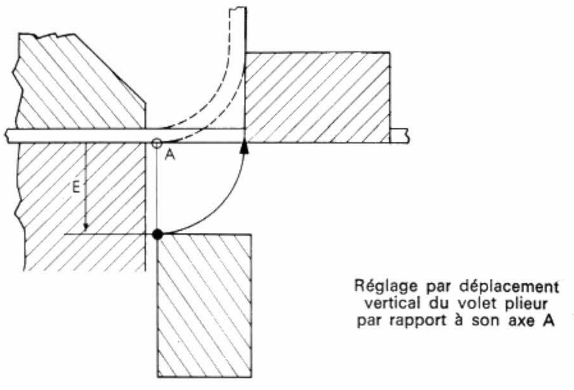
L'obtention d'un angle de pliage précis ne dépend pas seulement de la précision de l'outillage utilisé. Après déformation, quand cesse l'action de la partie active de la machine, l'élasticité du métal de la zone déformée se manifeste par une ouverture de l'angle du pli. Ce retour élastique, d'autant plus important que le métal est plus dur et que le rayon de courbure est plus grand vis-à-vis de l'épaisseur, doit être compensé en pliant la tôle de quelques degrés au-delà de l'angle prescrit pour obtenir celui-ci avec la précision désirée. Sur une même tôle, le retour élastique peut varier en fonction de la direction du pli par rapport au sens du laminage. Des essais sont nécessaires pour déterminer la compensation exacte.

7.2. Plieuses. — Ces machines comportent un bâti constitué de deux montants entretoisés qui supportent, outre les organes de commande, une table, un sommier presseur et un volet plieur.

La tôle, immobilisée sur la table par le sommier presseur, est pliée par la rotation du volet plieur (V. fig. V-35). Celui-ci reçoit l'effort moteur et tourne autour d'un axe matérialisé par deux tourillons réglables en position.



Réglage par déplacement horizontal de l'axe A du volet plieur



Réglage par déplacement vertical du volet plieur par rapport à son axe A

Fig. V-37 — Plieuses simples

Les plieuses simples, généralement à commande manuelle, ne comportent qu'une seule possibilité de réglage du volet plieur, soit horizontalement, soit verticalement (fig. V-37). Bien qu'elles réalisent des rayons irréguliers du fait que le centre de rotation du volet se trouve à l'extérieur du rayon de courbure, elles sont encore utilisées pour exécuter des travaux simples, sur tôles minces.

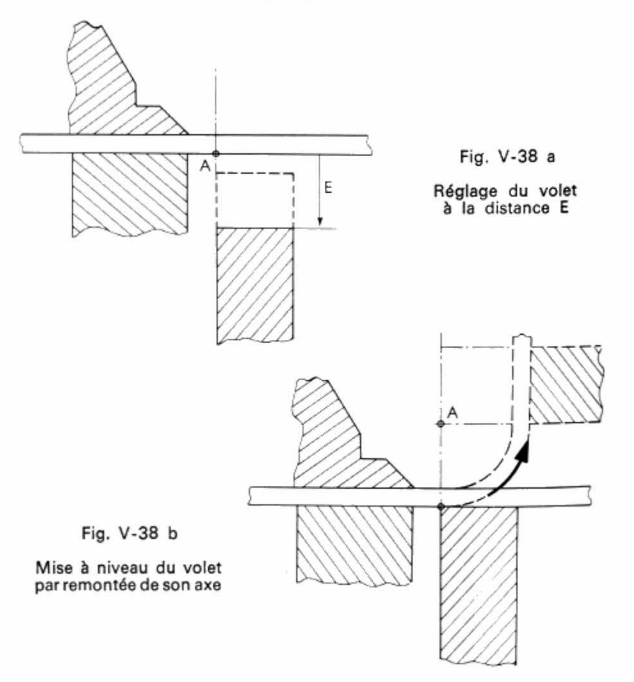


Fig. V-38 a

Réglage du volet à la distance E

Fig. V-38 b

Mise à niveau du volet par remontée de son axe

Fig. V-39 — Plieuse universelle à commande hydraulique (*Éts Favrin*)

Les plieuses universelles sont conçues pour faire coïncider l'axe de rotation du volet plieur avec le centre de courbure du pli. Le volet plieur est d'abord réglé à la distance E de son axe de rotation A (fig. V-38 a). Puis la table et le volet sont replacés dans le même plan, soit en remontant le volet et son axe (fig. V-38 b), soit en descendant la table au niveau du volet dont l'axe reste fixe (fig. V-39). La plupart des plieuses universelles (fig. V-39) permettent l'exécution de travaux très variés grâce à l'utilisation d'outillages complémentaires (pinces, blocs et règles de pliage).

7.3. Presses-plieuses. — Dans ce type de presse, la table et le coulisseau occupent tout le devant de la machine (fig. V-40). La commande du mouvement vertical du coulisseau est mécanique ou hydraulique; cette dernière solution est maintenant le plus fréquente car elle permet une grande souplesse d'emploi (limitation de l'effort et réglage précis du point bas de la course du coulisseau).

7.3.1. Cas général. — Un outillage classique équipe la presse: poinçon fixé au coulisseau et bloc de vés à plusieurs ouvertures fixé sur la table (fig. V-41, page suivante). On utilise le vé dont l'ouverture V est comprise entre 6 à 8 fois l'épaisseur de la tôle. Cette dernière est poussée sur les butées arrières; de l'autre côté, elle repose sur des galets ou est suspendue à un palan, suivant son poids et ses dimensions. Deux sortes de pliage se pratiquent:

— Le pliage *à fond*, où le poinçon serre la tôle au fond du vé: ce procédé qui s'apparente à l'emboutissage exige, presque dans chaque cas, un outillage correspondant (compte tenu du retour élastique) aux caractéristiques du pli à obtenir.

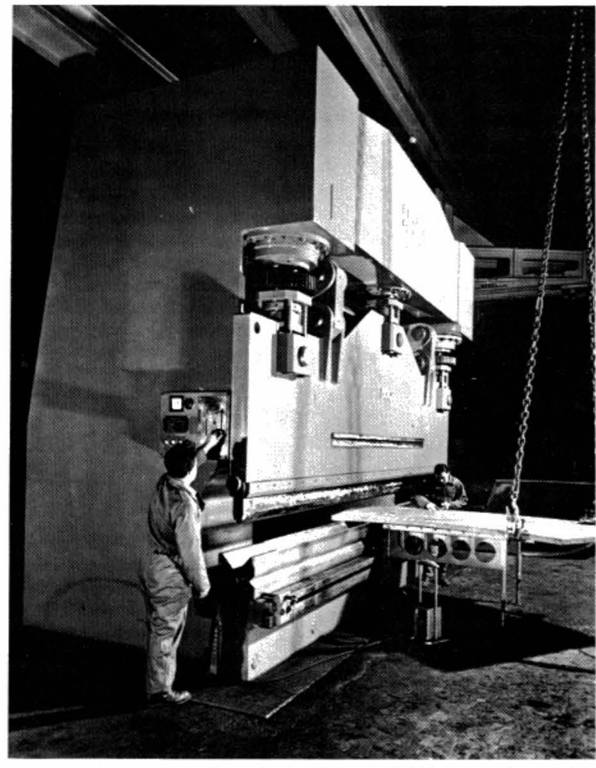
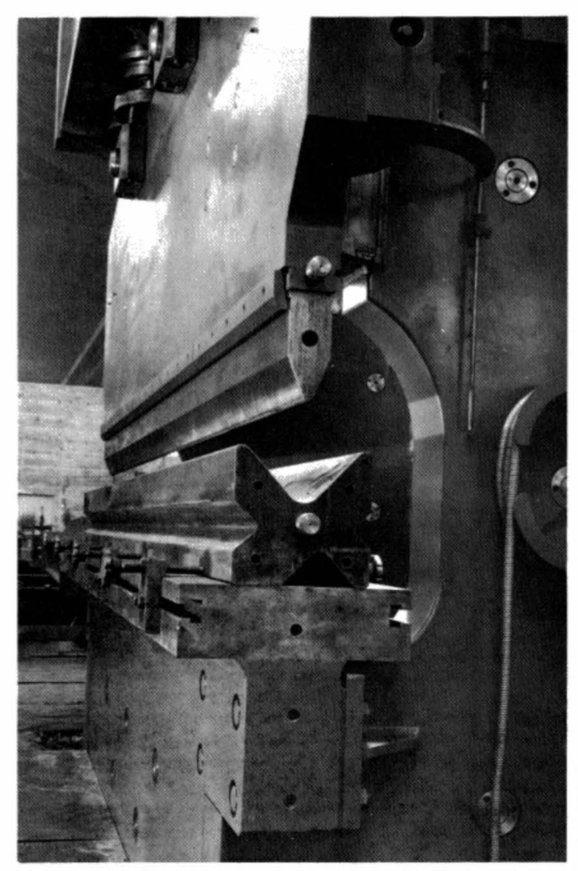


Fig. V-40 — Presse plieuse hydraulique de 8 000 kN (*A. Bernard*)



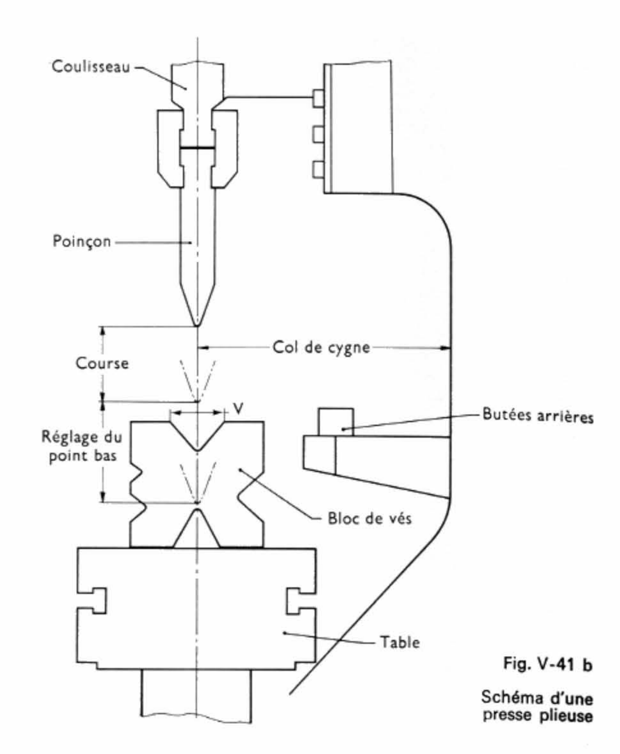


Fig. V-41 b

Schéma d'une presse plieuse

Fig. V-41 a

Presse plieuse de 10 000 kN en 5 m de long (*A. Bernard*)

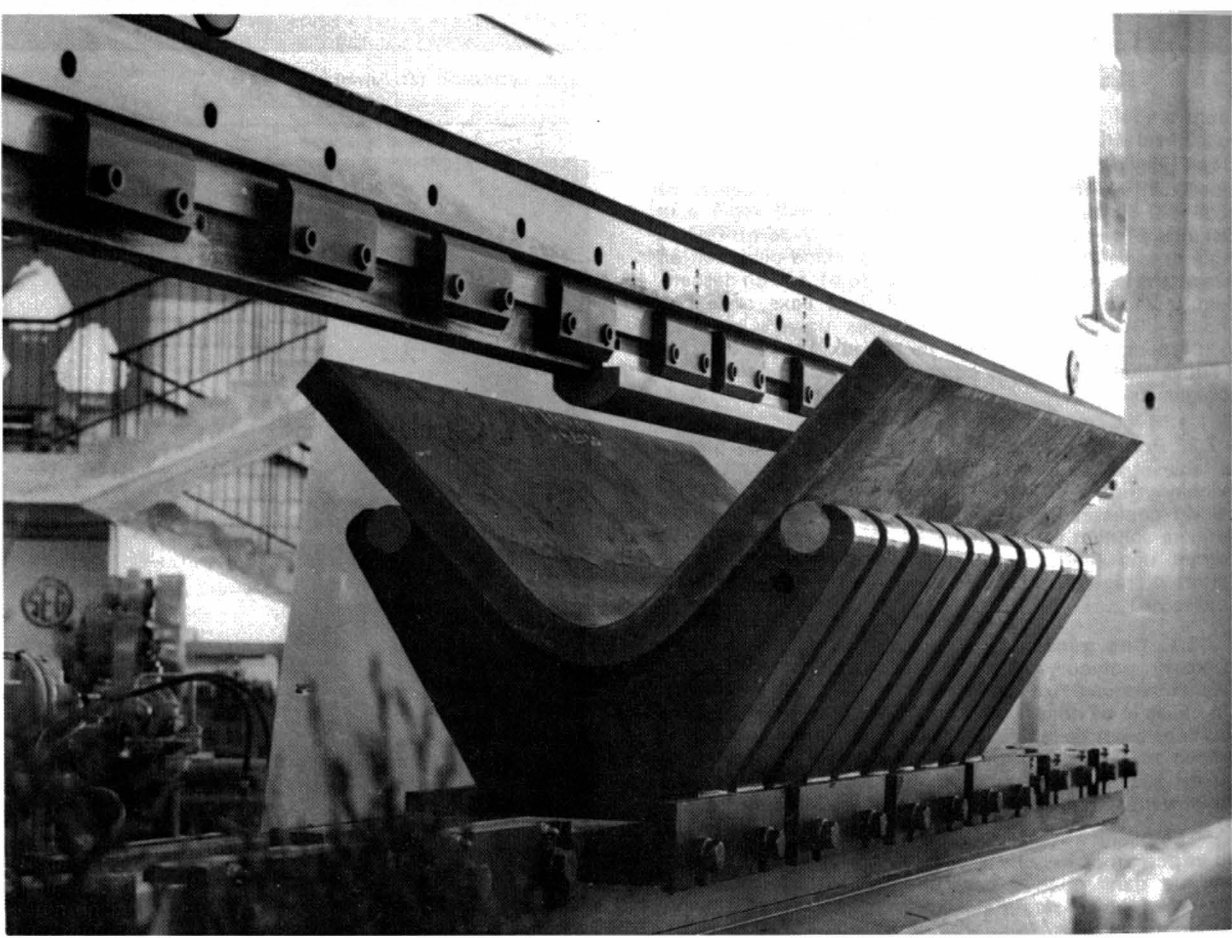


Fig. V-42 — Pliage en l'air (*Promécam*)

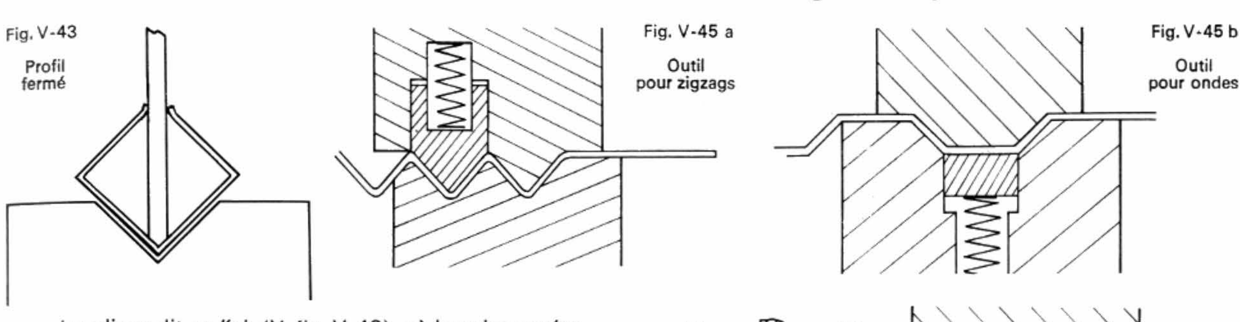


Fig. V-43

Fig. V-45 a Outil pour zigzags

Fig. V-45 b Outil pour ondes

— Le pliage dit *en l'air* (V. fig. V-42), où le poinçon s'arrête avec précision en un point préalablement réglé pour le travail à exécuter ; pour tenir compte du retour élastique, l'angle du vé est d'environ 85° lorsqu'il faut obtenir un pliage à 90° par un réglage précis du point bas. Ce réglage est éventuellement corrigé après l'exécution d'un pli d'essai.

Il est possible de réaliser des profils fermés si ce sont des polygones réguliers (fig. V-43). Il faut un poinçon déporté pour les polygones irréguliers (fig. V-44).

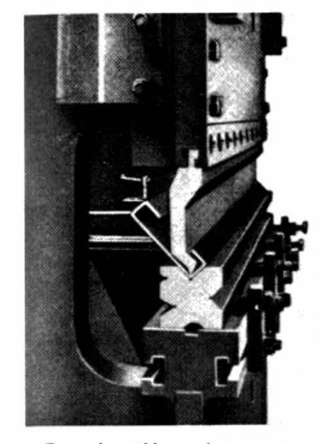


Fig. V-44

Presse à plier équipée pour le pliage de profilés (*Spiertz*)

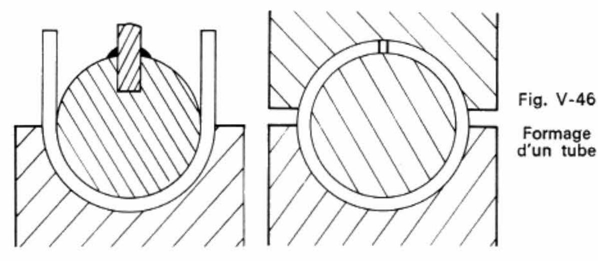


Fig. V-46

Formage d'un tube

Pour les tôles minces et moyennes, le vé peut être remplacé par une matrice constituée d'un élastomère (caoutchouc ou adiprène) enfermé dans un conteneur en U, dispositif qui supprime les rayures de la tôle dues au vé.

Pour les tôles fortes ($e > 5$ mm), le vé est parfois muni de galets facilitant le glissement. De plus, pour limiter les risques de criques aux extrémités du pli, il faut arrondir les angles de la tôle au droit du pli (et même meuler son chant) : on supprime ainsi les amorces de criques de la zone rompue par arrachage lors du cisaillage du flan.

Remarque : l'allongement permanent mesuré sur la fibre extérieure est bien supérieur à A (allongement après rupture donné par l'essai de traction) car, sous le poinçon, il se produit un fluage qui alimente les fibres tendues, surtout dans le pliage à fond.

7.3.2. Applications particulières. — En plus du pliage proprement dit, ces presses trouvent des applications variées grâce à l'emploi d'outillages ou de procédés particuliers.

1° *Plis répétitifs.* — Avec l'outillage classique, leur exécution impose un retournement du flan à chaque pli. Pour des travaux de série ou pour des tôles de grandes dimensions, on utilise alors des outils spéciaux réalisant plusieurs plis simultanément (fig. V-45).

2° *Poinçonnage.* — On peut employer des outils standard à col de cygne ou des outils en l'air pour le poinçonnage multiple en série. La presse est réglée pour que sa course corresponde à la course utile des poinçons. Il ne faut pas dépasser 60 % de sa puissance maximale afin de limiter les à-coups dus au débouchage ; l'étagement des poinçons (outil en l'air) diminue la puissance nécessaire et donne un débouchage progressif.

3° *Tubes spéciaux.* — Un outillage spécial permet la fabrication de tubes en deux opérations, la matrice de la première opération pouvant être en élastomère (fig. V-46).

4° *Croquage.* — À l'aide d'un vé de grande ouverture on donne une amorce de pli de grand rayon de courbure (fig. V-47). Applicable pour la fabrication de toute surface développable (fig. V-48), il est plus facile à exécuter sur presse hydraulique que sur presse mécanique. Les tôles sont préalablement tracées pour indiquer les positions successives de croquage. Dans le cas du croquage d'une extrémité de tôle, pour l'amorçage du roulage, (afin de limiter la partie droite qui subsiste) on utilise la plus petite ouverture de vé possible. Parfois on désaxe le vé par rapport au poinçon.

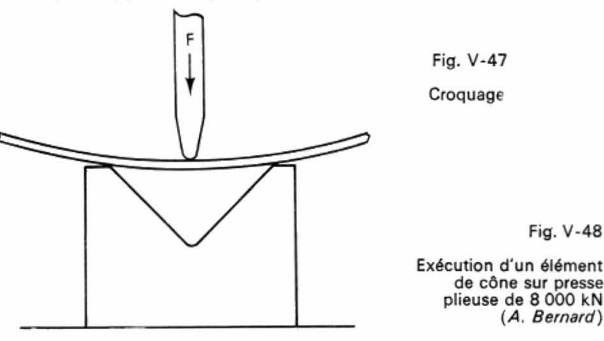
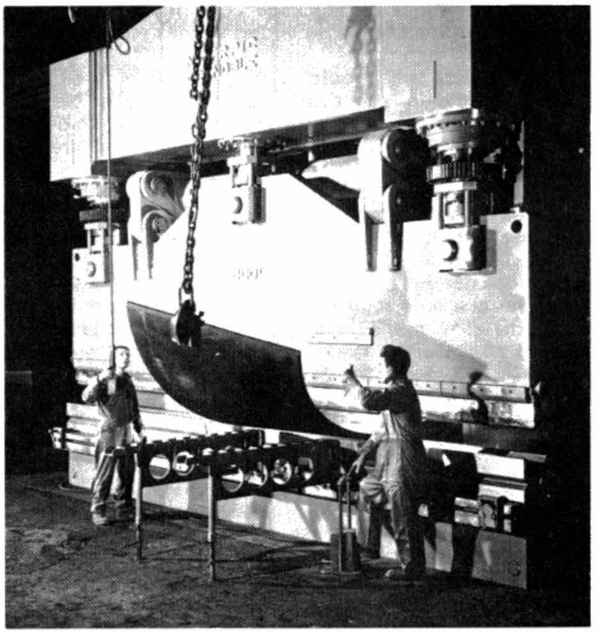


Fig. V-47

Croquage

Fig. V-48

Exécution d'un élément de cône sur presse plieuse de 8 000 kN (*A. Bernard*)



8. ROULAGE

8.1. Principe et domaine d'application. — L'opération de roulage consiste à transformer une tôle plane en une tôle cintrée suivant un rayon de courbure déterminé, en lui imposant une déformation permanente de flexion associée à un mouvement d'entraînement. Sur une machine à trois rouleaux, du type le plus simple dit pyramidal

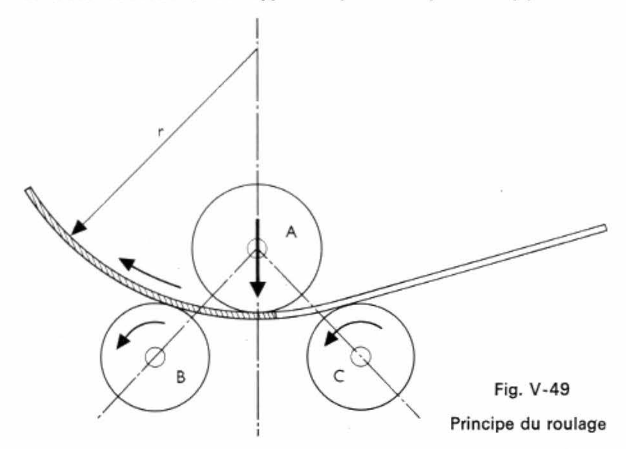


Fig. V-49
Principe du roulage

(fig. V-49), la tôle, entraînée par les deux rouleaux moteurs *B* et *C* est fléchie sous l'action du rouleau *A* dont la position en hauteur est réglable ; cela permet d'obtenir le rayon de courbure désiré. Le rayon définitif est obtenu après des passes successives de rayon progressivement décroissant.

Véritable machine de base des industries de la chaudronnerie, la machine à rouler les tôles — couramment appelée rouleuse — existe en une gamme très diversifiée tant sur le plan de la conception (selon le nombre de rouleaux, leur disposition, leurs possibilités de réglage et leur mode d'entraînement) que sur le plan des capacités. En effet, à côté de la simple machine de tôlerie à commande manuelle, on trouve la machine de chaudonnerie lourde utilisable pour cintrer des tôles pouvant atteindre 200 millimètres d'épaisseur en 4 mètres de largeur ou la machine à rouleaux de grande longueur (plus de 13 mètres) qui permet de cintrer des tôles dont l'épaisseur est voisine de 50 millimètres. Après achèvement de l'opération la pièce porte le nom de virole si la tôle vient se refermer bord à bord. Lorsque la longueur de la circonférence de la coque à fabriquer dépasse la longueur des tôles qu'il est possible d'utiliser, la virole est réalisée en plusieurs éléments. Ainsi, les réservoirs de stockage comportent un nombre très important d'éléments de viroles soudés entre eux.

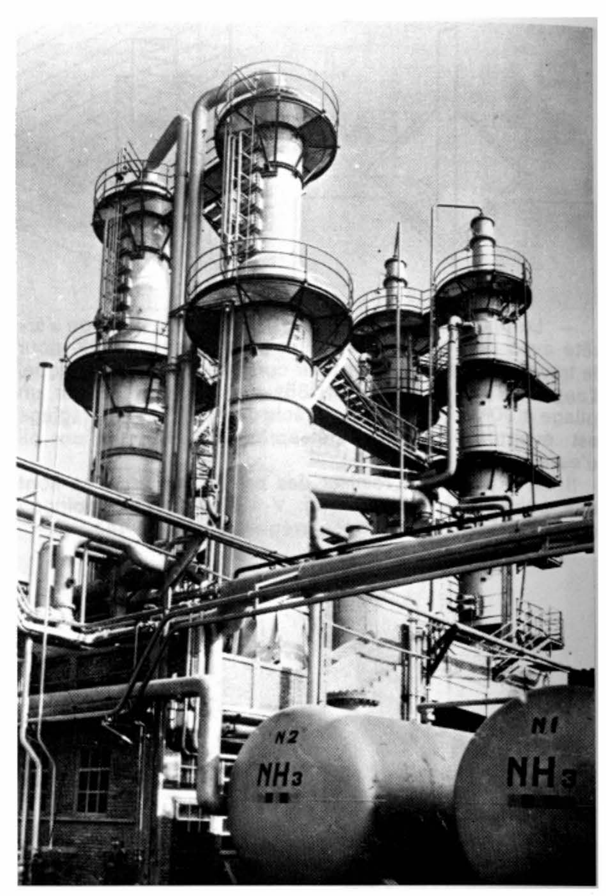


Fig. V-50 — Exemple de précision du roulage

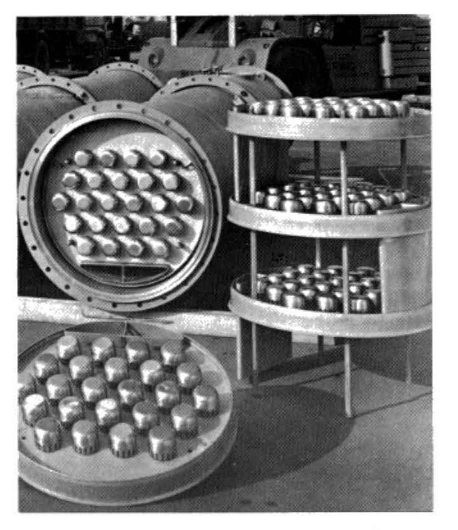


Fig. V-51
Plateaux de colonne en cours de montage

8.2. Qualité et précision (fig. V-50 et V-51). — L'obtention d'une virole cylindrique exige que la tôle soit présentée parallèlement aux axes des rouleaux, sinon les extrémités de la virole sont des hélices au lieu d'être des cercles.

L'opérateur doit aussi tenir compte d'une certaine anisotropie des tôles ; au cours des passes successives, il doit contrôler la régularité du rayon de courbure à l'aide de gabarits.

Le problème de base en roulage est l'impossibilité d'obtenir une courbure régulière au voisinage des extrémités : une partie plate, non cintrée, subsiste toujours et sa largeur dépend non seulement de l'habileté de l'opérateur mais aussi de la conception de la machine (V. § 8.3). Les viroles peuvent être aussi affectées de défauts de circularité plus ou moins importants. La valeur admissible de ces écarts de forme varie selon la nature et la destination des appareils à fabriquer. Un calibrage de la virole après soudage peut être nécessaire pour supprimer, d'une part les déformations consécutives à cette opération et, d'autre part, les parties non croquées.

Les appareils courants n'exigent pas de tolérances de circularité autres que celles conditionnant l'assemblage des viroles entre elles ou avec les fonds bombés formant les extrémités des réservoirs.

Du point de vue de la sécurité, dans les réservoirs soumis à une pression intérieure, les défauts de circularité engendrent des contraintes qui viennent s'ajouter à celles dues à la pression. Les codes de construction fixent des tolérances voisines de 1 % du diamètre intérieur nominal. En pratique, on peut obtenir assez facilement 0,5 %. Cependant, des conditions d'assemblage ou de fonctionnement peuvent imposer des tolérances plus sévères. Ainsi en génie chimique, pour des appareils comportant des agitateurs tournant avec un faible jeu par rapport à la paroi et pour les colonnes de distillation équipées de plateaux glissés à l'intérieur (puis soudés ou reposant sur des cercles supports), les tolérances d'ovalisation sont proches du millième du diamètre. Dans les échangeurs tubulaires, les viroles soudées aux plaques tubulaires doivent avoir une circularité précise. Les éléments de corps de chaudières

sont analogues aux échangeurs tubulaires : ils imposent les mêmes tolérances mais sur des tôles plus épaisses. En astronautique, les corps de fusées sont élaborés en chaudronnerie puis, la plupart du temps, usinés ensuite pour le positionnement des organes internes de l'engin. La fabrication chaudronnée de la virole doit être la plus précise possible afin d'utiliser des tôles d'épaisseur minimale compatibles avec les dimensions finales après usinage.

8.3. Amorçage ou croquage. — L'action du rouleau cintreur ne s'exerce pas jusqu'à l'extrémité de la tôle : à la fin d'une passe, la plus grande partie de la tôle comprise entre les rouleaux *A* et *C* ne subit pas de déformation permanente et se redresse en sortant de la machine (V. fig. V-49, partie non hachurée de la tôle). Une bande plate importante subsiste donc à chaque extrémité ; sa largeur varie selon la conception de la machine, la disposition des rouleaux et l'épaisseur de la tôle.

La suppression de cette partie plate est souvent rendue nécessaire (V. § 8.2).

Pour les tôles minces ($e \leqslant 3$ mm), diverses méthodes peuvent être appliquées :

— formage au maillet, suivant des génératrices, la tôle étant disposée sur les rouleaux inférieurs et maintenue par une faible pression du rouleau cintreur *A* (fig. V-52) ;

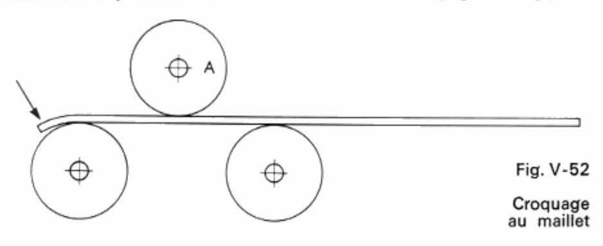


Fig. V-52 Croquage au maillet

— remise au rond après soudage ;

— suppression par découpage après roulage.

Pour les tôles moyennes et fortes, les deux premières méthodes sont inapplicables. Le croquage est alors effectué avant roulage (fig. V-53) :

— soit sur la machine de roulage elle-même lorsqu'elle est du type croqueur (V. ci-après) ;

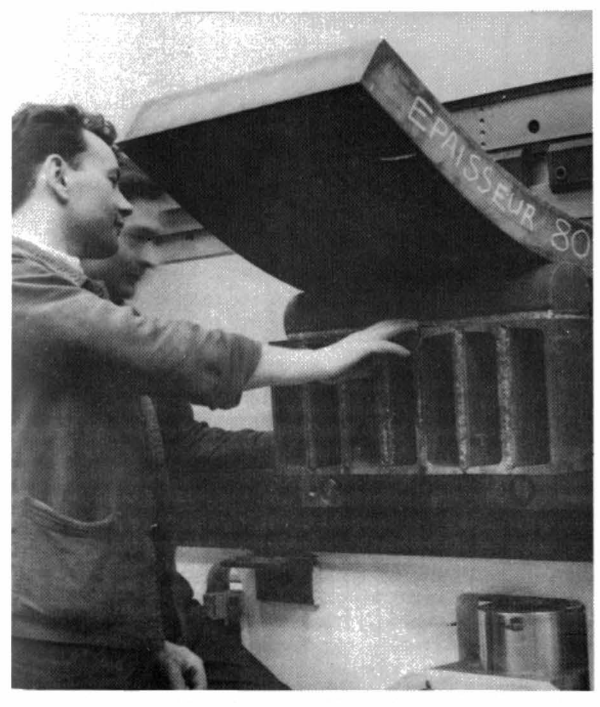


Fig. V-53 — Amorçage avant roulage d'une tôle de 80 mm d'épaisseur (*Promécam*)

— soit à la presse-plieuse à l'aide d'un outillage classique ou d'outils spéciaux (V. § 7.3.2, 4°).

Croquage sur machine de roulage (fig. V-54) : Les machines dont les rouleaux peuvent être placés asymétriquement, comme sur la figure, permettent de réaliser cette opération (les rouleaux étant à l'arrêt). Une largeur *a* de tôle est engagée entre les rouleaux *A* et *B* pour éviter que la tôle échappe ; sa valeur minimale dépend essentiellement de l'opérateur et ne descend pratiquement pas en dessous du double de l'épaisseur *e* de la tôle. Après serrage des rouleaux *A* et *B*, le rouleau *C* remonte et plie la tôle par flexion : la déformation est surtout importante dans la zone de l'encastrement réalisé par les rouleaux *A* et *B*, ce qui permet d'obtenir une courbure de la tôle au voisinage de l'extrémité.

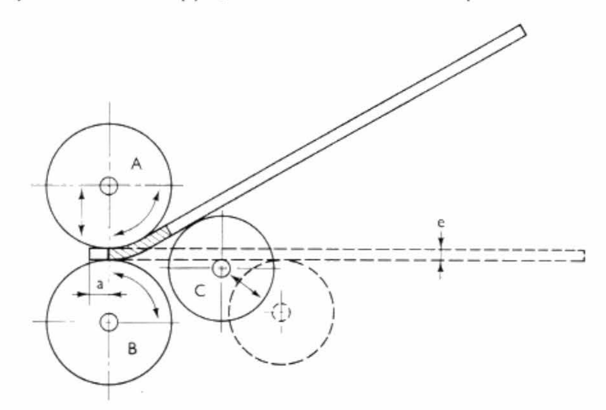


Fig. V-54 — Croquage sur machine de roulage à trois rouleaux asymétriques

Remarque 1 : Seule la partie hachurée de la tôle subit des déformations permanentes et il subsiste toujours une bande étroite qui reste droite. La largeur de cette bande n'est pas inférieure à 2 *e*. Ainsi, quelle que soit la méthode de croquage (machine de roulage ou presse-plieuse) un petit plat à chaque extrémité de la tôle est inévitable. Si ce plat est inacceptable (pour des raisons de construction ou de tolérances), il faut prévoir une surlongueur de tôle de la dimension du plat prévu et couper cette surlongueur après croquage, ce qui permet d'obtenir une courbure régulière après roulage (c'est la méthode utilisée pour les viroles de petit diamètre et de forte épaisseur).

Remarque 2 : Pour les machines du type croqueur, c'est la plus forte épaisseur de tôle que la machine doit être capable de croquer qui conditionne le dimensionnement des rouleaux et la puissance du moteur. En effet, pour une même épaisseur de tôle, les efforts lors du croquage sont beaucoup plus importants que lors du roulage. De plus, le rouleau croqueur supporte une réaction due au poids de la tôle à croquer si celle-ci n'est pas soutenue par un autre moyen. Une machine peut donc rouler des tôles plus épaisses que celles qu'elle est capable de croquer. C'est pourquoi le croquage à la presse hydraulique est la méthode la plus employée.

8.4. Machines de roulage

8.4.1. Qualités requises. — Pour réaliser des viroles dans le minimum de temps et avec des tolérances de l'ordre du millième du diamètre, ces machines doivent : croquer aux deux extrémités sans retournement de la tôle, laisser non croquée la plus petite partie possible, permettre le calibrage de la virole soudée pour reprendre les parties non croquées et celles déformées du fait de la soudure. La possibilité de réalisation de cônes, avec le minimum de transformations de la machine, est appréciable.

8.4.2. Différents types

— *Machines à deux rouleaux :* ce type, le plus économique, est utilisable pour les tôles minces du domaine de la tôlerie. Sa capacité en épaisseur est accrue par l'emploi

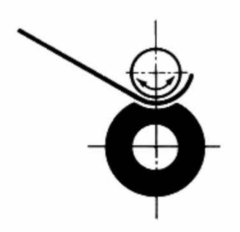


Fig. V-55

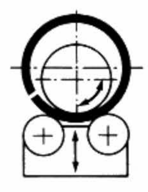


Fig. V-56

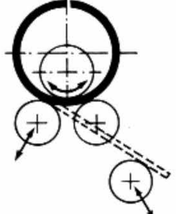


Fig. V-57

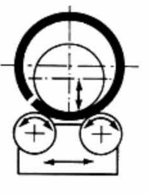


Fig. V-58

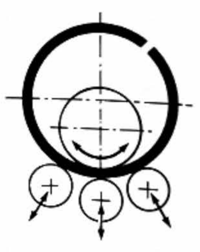


Fig. V-59

d'un rouleau recouvert de polyuréthanne formant matrice souple tournante (fig. V-55).

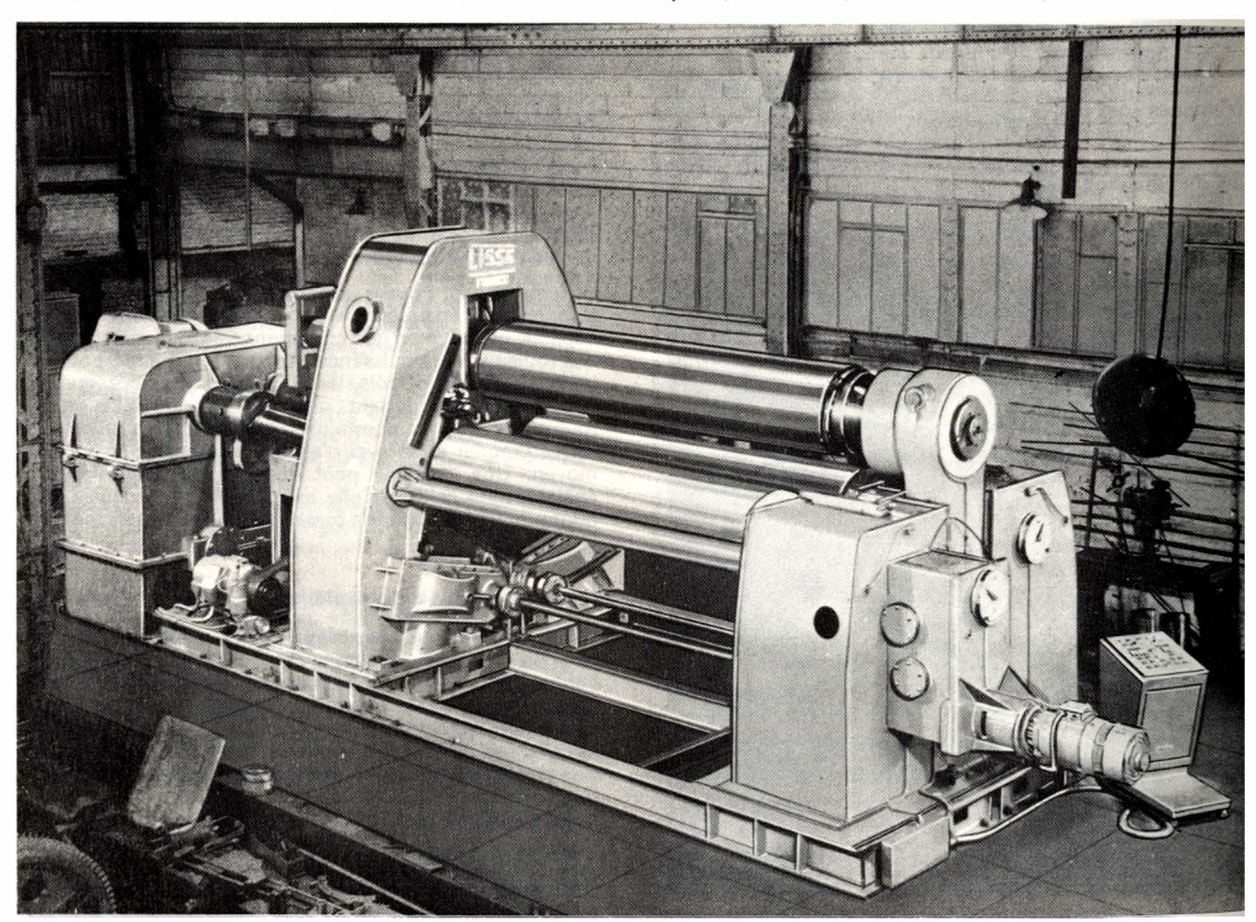
— *Machines à trois rouleaux du type pyramidal :* en général le cylindre supérieur est libre en rotation et mobile dans un plan vertical ; les cylindres inférieurs, moteurs, restent en position fixe (V. fig. V-50). Ce type, de plus en plus abandonné car la disposition des rouleaux ne permet pas le croquage, reste employé pour le travail des tôles de forte épaisseur car il est simple et robuste (rôles des rouleaux inversés, fig. V-56).

— *Machines à trois rouleaux du type croqueur :* le sens du déplacement des rouleaux inférieurs permet d'effectuer le croquage directement sur la machine.

Dans le cas de trois rouleaux asymétriques, le rouleau supérieur et le rouleau inférieur, situés dans un même plan vertical, sont moteurs. Le cylindre supérieur, mobile dans ce plan, pince la tôle sur le cylindre inférieur. Le rouleau latéral est libre en rotation et mobile dans un plan oblique : il porte le nom de rouleau croqueur. Ce type de machine, relativement simple, n'est pratiquement employé que pour le formage de tôles de forte épaisseur car il permet de les présenter horizontalement pour le croquage ; en revanche, il faut retourner la tôle pour croquer l'autre extrémité. L'exécution de cônes est délicate.

Dans le cas de trois rouleaux symétriques, le cylindre supérieur fixe est moteur et les cylindres inférieurs sont libres (ou inversement). Ces derniers se déplacent dans des plans verticaux, dans des plans obliques (fig. V-57) ou dans un plan horizontal. Du fait de la symétrie, les croquages successifs des extrémités sont exécutés sans retournement de la tôle mais celle-ci doit être présentée inclinée, ce qui limite son épaisseur (poids) et sa longueur. L'exécution de cônes est possible en inclinant légèrement les rouleaux croqueurs, surtout s'ils se déplacent dans des plans obliques. Une variante de ce type de machine (rouleaux croqueurs à déplacement horizontal et rouleau supérieur à déplacement vertical ; fig. V-58) permet de présenter la tôle horizontalement pour le croquage et de former des tôles de très forte épaisseur ; cette variante, très complexe, nécessite des chemins à rouleaux pour la manutention des tôles avant formage (V. fig. V-51).

— *Machines à quatre rouleaux dont deux croqueurs :* ces machines (fig. V-59) présentent les avantages des machines à trois rouleaux asymétriques (présentation horizontale de la tôle à croquer) et des machines à trois rouleaux symétriques (croquages successifs des extrémités sans retournement). Elles permettent également le planage des tôles. Le rouleau supérieur, dont l'axe ne peut être déplacé, est moteur ; le rouleau inférieur, libre et mobile verti-



Cintreuse à trois rouleaux symétriques pour le roulage des tôles (*Éts Lisse*)

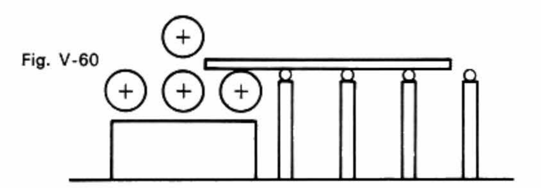
calement, est appelé rouleau pinceur. Les rouleaux latéraux sont mobiles dans des plans obliques. Le rouleau pinceur abaissé, ces machines permettent l'exécution des cônes.

Ce type de machine s'adapte particulièrement bien aux travaux de grosse chaudronnerie.

8.4.3. Commande. — La commande mécanique est la plus courante : les rouleaux moteurs sont entraînés par des groupes motoréducteurs dont les réducteurs ont des dimensions importantes étant donné les couples élevés qui sont mis en jeu ; les déplacements des rouleaux sont commandés par des transmissions mécaniques (vis et écrou, engrenages, roue et vis sans fin).

La commande hydraulique se développe, soit limitée aux vérins de déplacement des rouleaux, soit intégrale (moteurs hydrauliques d'entraînement des rouleaux). Cette commande permet de grands efforts pour une puissance installée modeste. Elle facilite le calibrage après soudure, la machine fonctionnant alors comme une presse.

8.4.4. Environnement. — Le temps du roulage proprement dit entrant pour une faible part dans le temps total de formage d'une virole, le poste d'envirolage doit être soigneusement étudié pour réduire les temps des manutentions au minimum. Des équipements spéciaux facilitent ces manutentions : chemin de billes à hauteur du rouleau inférieur (fig. V-60), support réglable maintenant la virole en cours de roulage dans le cas de tôles minces et soulageant les rouleaux croqueurs dans le cas de tôles épaisses


Fig. V-60

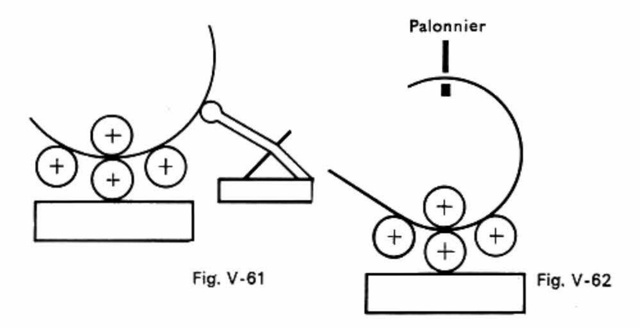


Fig. V-61

Fig. V-62

(fig. V-61), palonnier en C jouant le même rôle et servant à transporter la virole après roulage (fig. V-62). Pour éviter de déformer la virole pendant son transport (surtout les viroles minces) on soude par points les bords de la virole, alors que celle-ci est encore sur la rouleuse ; sa rigidité est ainsi augmentée.

TRAVAIL DES TUBES

Le tube, comme demi-produit, est largement utilisé dans des domaines extrêmement divers :

— En charpente et en serrurerie il joue le rôle d'un élément de construction devant résister à des sollicitations mécaniques.

— Dans le mobilier métallique et l'architecture c'est un élément utilitaire et décoratif.

— Dans les industries du chauffage et du froid, il sert de conducteur d'énergie thermique.

— Dans la tuyauterie industrielle (diamètres et épaisseurs importantes), il conduit des fluides de toutes natures dans des conditions extrêmement variées de température et de pression. Les tubes sont classés soit d'après leur mode de fabrication (laminés ou étirés, soudés ou sans soudure) soit d'après la nature du matériau constitutif (aciers alliés ou non alliés, alliages à base d'aluminium, de cuivre ou de nickel).

Les procédés de mise en œuvre sont très variés et souvent conditionnés par les domaines d'application. Chacun de ces domaines présente un caractère spécifique et pose des problèmes particuliers. L'esthétique, la résistance à des sollicitations mécaniques, la conception des assemblages, les prix de revient de la fabrication, les problèmes de montage en atelier et sur le chantier, la résistance à la corrosion, aux pressions élevées et aux basses ou aux hautes températures sont autant de facteurs intervenant individuellement ou simultanément.

Ces procédés de mises en œuvre exigent parfois des précautions particulières comme pour la conservation de l'état de surface qui implique de préserver les tubes des rayures et des chocs.

9. PRÉPARATION DES TUBES

9.1. Dressage. — Bien que les tubes soient livrés dressés, il est nécessaire de s'assurer qu'ils sont bien droits avant toute opération. Dans le cas contraire, différentes méthodes de dressage sont utilisées :

— Pour les petits tubes : le dressage est réalisé à la main entre deux butées (fig. V-63).

— Pour les tubes plus importants : le dressage est exécuté sur des presses à dresser.

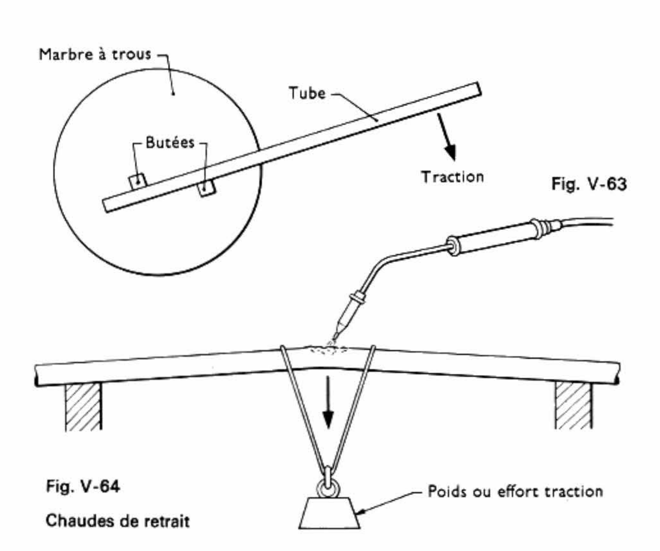


Fig. V-63

Fig. V-64

Chaudes de retrait

— Pour les tubes pouvant supporter des tensions internes : on réalise le dressage « par chaudes de retrait » (fig. V-64). Ce procédé ne s'applique pas aux aciers autotrempants (aciers au chrome).

9.2. Traçage. — C'est une opération que l'on essaie d'éviter en utilisant des machines ou des montages spéciaux. Il est souvent utile dans les fabrications unitaires et pour certains travaux particuliers.

9.2.1. Trusquinage des tubes. — Il est utilisé pour le traçage d'un axe de référence porté par une génératrice du tube. Par exemple, pour les tubes de grandes longueurs, le traçage peut être exécuté de la manière suivante : le tube étant fixé, on place une équerre à chapeau sur laquelle est disposée un niveau (fig. V-65). L'équerre étant horizontale,

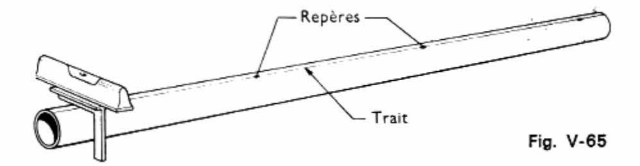


Fig. V-65

on marque le point de contact et on répète cette opération de place en place.

Pour obtenir des axes parallèles séparés par une distance déterminée, on trace d'abord une génératrice comme indiqué précédemment. Ensuite on utilise une bande métallique qui épouse exactement la forme du tube et dans laquelle a été réalisée une coupure dont la longueur l correspond à la distance angulaire α qui sépare les deux axes (fig. V-66) :

$$l = \frac{L\alpha}{360}$$

Dans cette expression L représente le périmètre extérieur du tube. On exprime α en degrés, et on utilise la même unité de longueur pour L et l (le millimètre, par exemple).

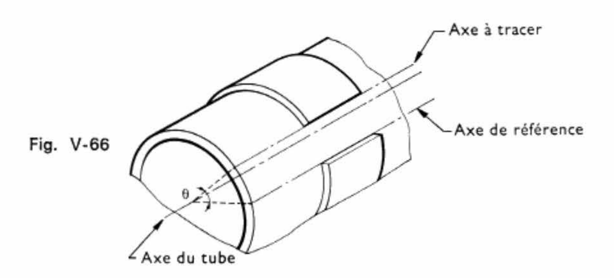


Fig. V-66

9.2.2. Traçage de coupes d'équerres ou obliques.

— On roule autour du tube une bande de métal de faible épaisseur dont les bords ont été parfaitement adaptés à la coupe souhaitée. Cette méthode permet notamment de réaliser le traçage de coupes planes biaises (fig. V-67).

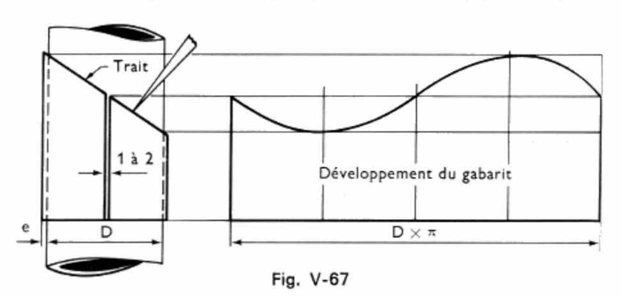


Fig. V-67

9.2.3. Traçage des ouvertures.

— Il existe diverses méthodes. Dans tous les cas, on trace d'abord les axes de pénétration sur le tube à découper : axe longitudinal, axe transversal. Ensuite on peut tracer l'ouverture à l'aide d'un gabarit : sur l'épure exécutée pour le traçage de la tubulure on relève les formes et dimensions du gabarit en repérant les axes de référence. Le gabarit est alors cintré au diamètre extérieur du tube et on exécute le traçage de la pénétration (fig. V-68).

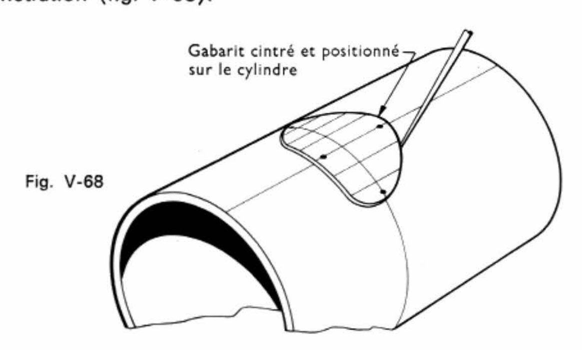


Fig. V-68

9.3. Débitage.

— On réalise le débit selon deux méthodes distinctes :

— Soit à l'aide d'*outils de coupe* (scies, tronçonneuses) ; cette méthode est utilisée uniquement pour les coupes planes de tubes de toutes natures sauf si leur diamètre est grand.

— Soit par *coupe thermique* (oxycoupage, plasma) ; ces moyens de coupe ont l'avantage d'être très souples et de s'appliquer aux coupes de toutes sortes ; en revanche, ils exigent presque toujours un meulage ou un usinage pour faire disparaître la zone superficielle qui a été oxydée. Les aciers fortement alliés (inoxydables, par exemple) ne se coupent que par oxycoupage à la poudre ou au jet de plasma. La poudre de fer ou d'aluminium élevée à la température de l'oxygène facilite les réactions de fusion et d'oxydation des divers constituants de l'alliage à couper. Le jet de plasma permet le découpage par fusion et non par oxydation (V. t. 3, Découpage).

Pour exécuter les opérations de débit, il est indispensable d'immobiliser le tube en position et en rotation. Il existe de très nombreux moyens de serrage allant de l'étau ordinaire aux montages spéciaux. Citons les étaux à tubes pour les petits et moyens diamètres (fig. V-69).

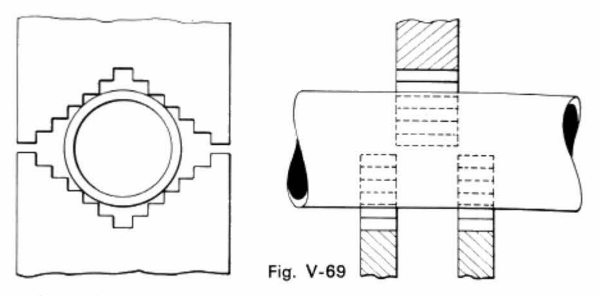


Fig. V-69

Pour les travaux de petite série, on utilise des outils de coupe manuels : scie à main (pour les coupes planes) et coupes-tubes à main (fig. V-70). Ceux-ci n'agissent pas par enlèvement de copeaux mais par pénétration dans le métal, ce qui provoque un refoulement, des déformations et des bavures. Ils ne permettent d'exécuter que des coupes d'équerre. En ce qui concerne l'oxycoupage manuel, on sait qu'il impose de porter le métal à 1 300 °C ; on envoie alors un jet d'oxygène qui fait une saignée par oxydation. Les aciers non alliés et faiblement alliés sans chrome se coupent parfaitement par oxycoupage. Divers procédés de guidage permettent d'améliorer la régularité de la coupe.

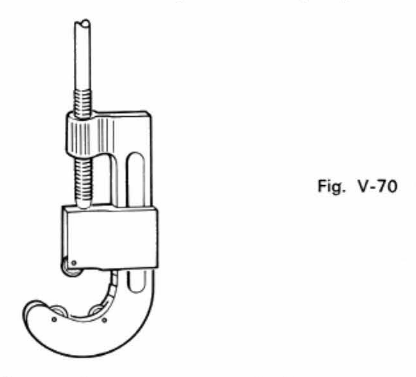


Fig. V-70

9.4. Découpage d'ouvertures.

— Les ouvertures peuvent avoir des formes variées. Leur découpage peut être fait :

— Au chalumeau après un tracé préalable.

— Avec des machines de coupes mécaniques : perceuses (pour les petits diamètres), fraiseuses (pour les diamètres de 100 à 150 mm), aléseuses pour les ouvertures de grandes dimensions.

— Avec des machines de coupes thermiques qui peuvent être classées en deux groupes principaux :

- Les machines mobiles : l'ensemble de la machine est posé sur le tube. Elles permettent de travailler sur place des tubes longs et difficiles à manœuvrer.
- Les machines fixes : ce sont soit des machines à copier d'après un gabarit, soit des machines automatiques utilisées pour le débit des tubes et équipées d'un dispositif additionnel qui permet le découpage de pénétrations.

9.5. Chanfreinage.

— Le chanfreinage est une opération importante pour la réussite d'une soudure de qualité. On distingue les chanfreins en V (pour les épaisseurs de

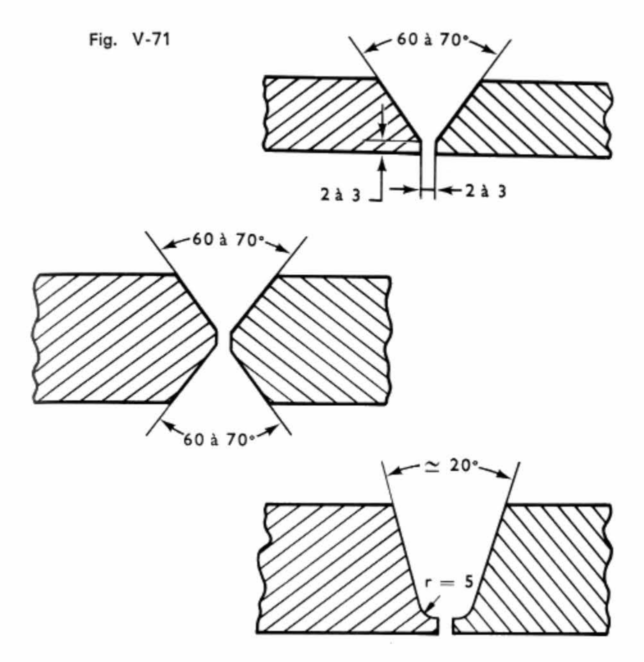


Fig. V-71

5 à 10 mm), en X pour les épaisseurs de 10 à 20 mm, en tulipe pour les grandes épaisseurs bien qu'il soit difficile et coûteux (fig. V-71).

On réalise le chanfreinage :

— à la meule fixe ou portative,

— au chalumeau oxycoupeur (pour les chanfreins en V ou en X seulement) ;

— à la machine portative : par cisaillage, sur de petites sections ;

— par coupes mécaniques exécutées sur machines fixes ou mobiles (tour, aléseuse, etc.).

10. DUDGEONNAGE DES TUBES

Le dudgeonnage est une méthode permettant d'assurer la fixation d'un tube dans l'alésage d'une plaque à l'aide d'un appareil appelé dudgeon (fig. V-72). Celui-ci, disposé à l'intérieur du tube, réalise mécaniquement et à froid une expansion du tube telle qu'il subsiste une pression résiduelle après retrait du dudgeon. Cette pression s'exerce sur le pourtour de l'alésage et réalise ainsi une liaison permanente du tube avec la plaque.

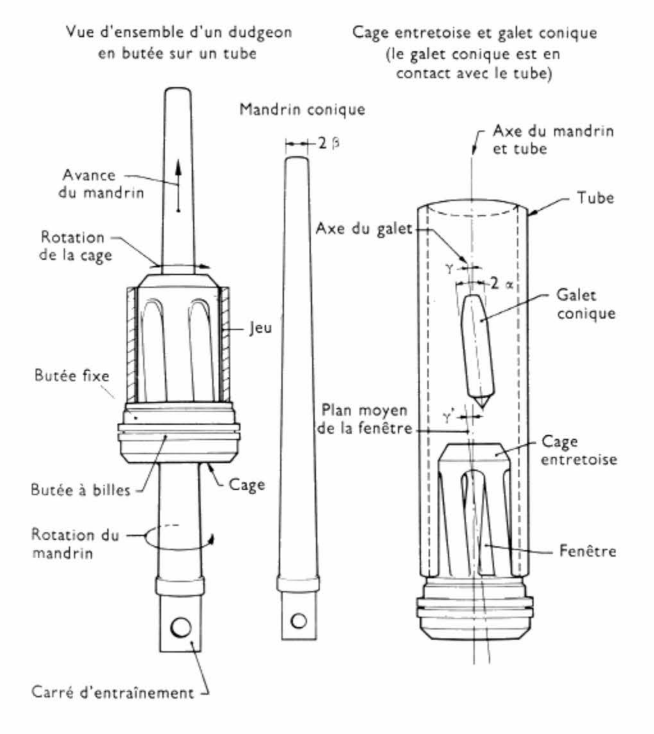


Fig. V-72 — Vue d'ensemble et détail d'un dudgeon

Cette technique, employée seule ou complétée par le soudage de l'extrémité des tubes sur la plaque tubulaire, est appliquée dans la construction des échangeurs de chaleur des chaudières et de certains réacteurs nucléaires.

Le dudgeon a bénéficié de nombreux perfectionnements depuis l'invention de son prototype breveté par R. Dudgeon en 1867. Il en existe de divers types essentiellement constitués de galets prenant appui sur un mandrin conique animé d'un mouvement de rotation. Les galets, de faible conicité, sont légèrement inclinés par rapport à l'axe de rotation ; cette disposition provoque l'avance automatique du mandrin sans qu'il soit nécessaire d'exercer une poussée axiale (fig. V-73).

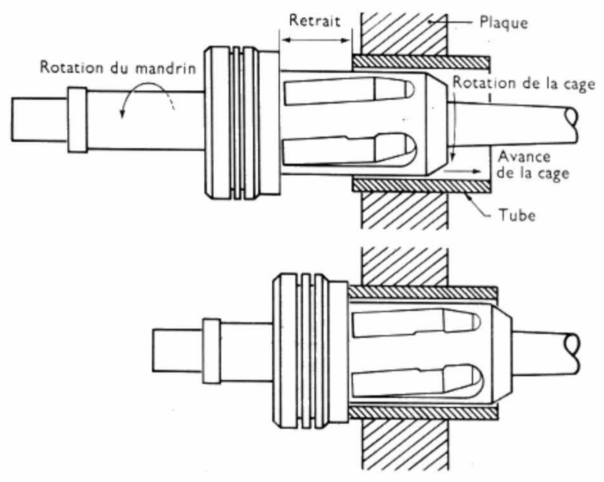


Fig. V-73 — Technique du dudgeonnage dite « par passe »

Lorsque le couple appliqué au mandrin atteint une valeur déterminée expérimentalement, ce mouvement de rotation est inversé et l'appareil peut être dégagé.

11. CONFECTION DES COUDES

11.1. Généralités. — Un coude est défini par le diamètre extérieur *D*, l'épaisseur du tube *e*, le rayon moyen du cintrage *R* et l'angle α (fig. V-74).

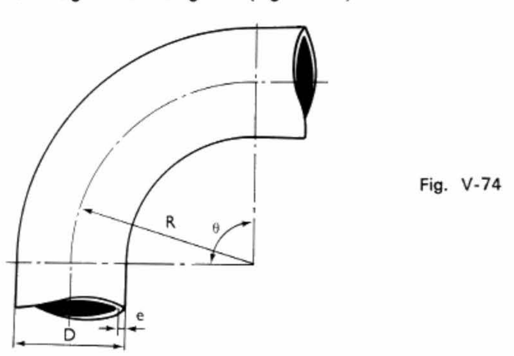


Fig. V-74

L'opération de cintrage présente souvent des difficultés liées aux précautions à prendre pour éviter les déformations susceptibles de se produire sous l'action des efforts appliqués à une section circulaire de faible épaisseur.

Ces difficultés peuvent être évitées par l'emploi de raccords dits « courbes du commerce », parfaitement calibrés, qu'il est possible de souder. On peut également éviter le cintrage en utilisant des coudes en segments. Cette solution est même indispensable dans le cas de grosses conduites. Les segments sont assemblés par soudage et quelquefois par agrafage pour les petites conduites d'aspiration en tôle mince. La disposition et la forme des seg-

ments, pour un coude de 90° en quatre segments, sont données par la figure V-75. Ces coudes peuvent être exécutés à partir de tubes ou de viroles en tôle.

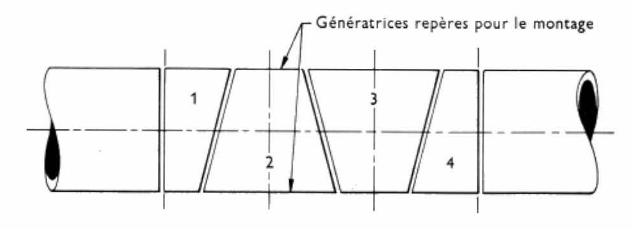
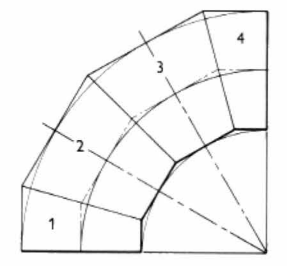


Fig. V-75



Cependant, le cintrage est souvent la seule solution possible ou rationnelle pour les tubes de faible diamètre (notamment les serpentins), dans le cas de courbes de grand rayon et pour les travaux de grande série. Il est donc nécessaire de préciser le comportement du métal au cours du cintrage. Le passage de la forme rectiligne à la forme courbe s'accompagne d'un allongement des fibres extérieures et d'un refoulement des fibres intérieures avec formation de plis sur la paroi intérieure et rapprochement de la paroi extérieure vers la fibre moyenne (c'est-à-dire une ovalisation de la section ; fig. V-76). Les déformations sont d'autant plus marquées que le rayon de courbure et

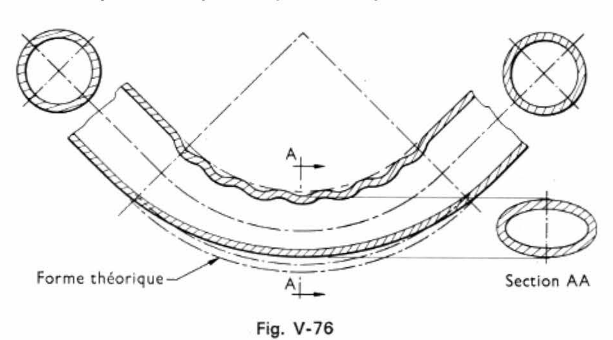


Fig. V-76

l'épaisseur sont plus faibles vis-à-vis du diamètre extérieur du tube. Les tubes sont d'ailleurs classés en trois catégories, en fonction du rapport $\frac{D}{e}$ et le cintrage est d'autant plus difficile que ce rapport est plus grand :

— tubes épais : $\frac{D}{e} < 15$

— tubes moyens : $15 < \frac{D}{e} < 30$

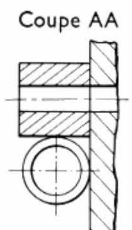
— tubes très minces : $\frac{D}{e} > 30$

Le coefficient $K = \left(\frac{D}{R}\right)\left(\frac{D}{e}\right)$ permet de chiffrer la difficulté du cintrage. Cependant, ce coefficient ne suffit pas à lui seul, pour définir les conditions d'un cintrage correct. En effet, les caractéristiques du métal ont une influence déterminante. Une grande résistance à la traction n'est pas toujours défavorable. Ainsi, les aciers inoxydables supportent bien les déformations tout en exigeant des puissances supérieures à celles nécessaires pour les aciers non alliés (toutes choses égales par ailleurs).

11.2. Cintrage à la main. — On peut cintrer à vide ou sur tubes remplis. Dans tous les cas, ces méthodes ne s'appliquent qu'au cintrage des tubes de petits et de moyens diamètres.

11.2.1. Cintrage à vide. — Le tube s'ovalise très rapidement et cette méthode ne peut convenir que pour les tubes épais, cintrés suivant de grands rayons.

À froid, le tube se cintre là où il porte sur le tasseau d'appui (celui-ci est en métal ou en bois ; il ne doit pas présenter d'angles vifs ; fig. V-77). Par des déplacements successifs du tube on peut obtenir un coude de grand rayon dont la forme dépend de la régularité des mouvements d'avance et de l'effort exercé en bout de barre à chaque avance. Ce procédé s'applique aux tubes inoxydables et en matériaux non ferreux.



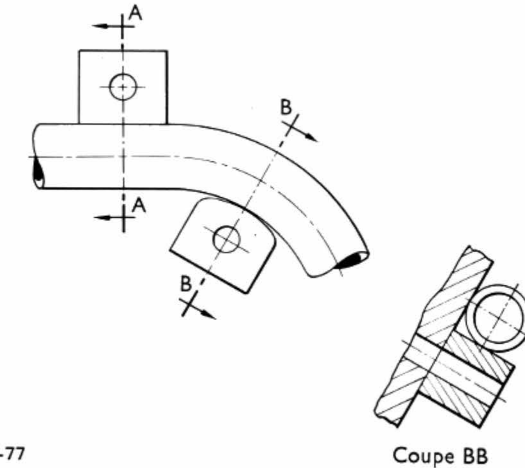


Fig. V-77

À chaud, on cintre surtout les tubes d'acier. Le tube ne doit pas porter sur le tasseau d'appui dans la zone cintrée (fig. V-78). Le chauffage est fait au chalumeau ou dans

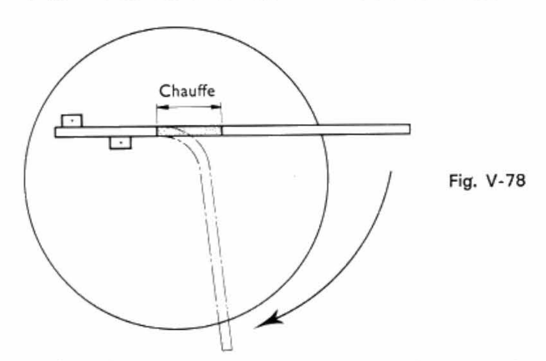


Fig. V-78

un four. Lorsque la température est atteinte, on place rapidement le tube entre les tasseaux et on exerce l'effort de cintrage dans un mouvement continu et sans à-coups, en contrôlant la régularité du cintrage avec un gabarit

11.2.2. Cintrage sur tubes remplis. — Avant d'exécuter le cintrage, on remplit le tube de sable fin, de résine ou d'alliage à bas point de fusion. Si le tube est bien rempli, le produit de remplissage s'oppose à l'applatissement du tube à l'extérieur et, dans une moindre mesure, à la formation de plis à l'intérieur.

— *Le cintrage au sable* est utilisé pour les tubes en acier (cintrage à chaud). On commence par le remplissage du tube avec du sable très sec. Quand le sable est parfaitement tassé, on ferme le tube. Le chauffage et le cintrage sont ensuite exécutés de la même manière que si le tube était vide. Dans le cas de petites séries, il peut être avantageux d'utiliser des formes pour le cintrage (fig. V-79). Une surveillance constante est cependant nécessaire car le tube se cintre là où il est le plus chaud.

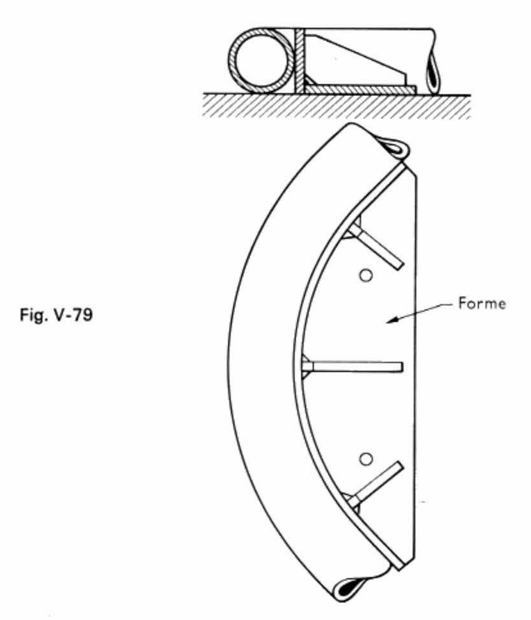


Fig. V-79

— *Le cintrage à la résine* est exécuté à froid dans le cas de tubes en acier inoxydable, en cuivre, en alliages légers. La résine est fondue dans un fondoir et coulée dans le tube dressé après qu'il ait été parfaitement séché intérieurement. Le cintrage se fait comme dans le cas des tubes vides. Après cette opération on vide le tube en le chauffant.

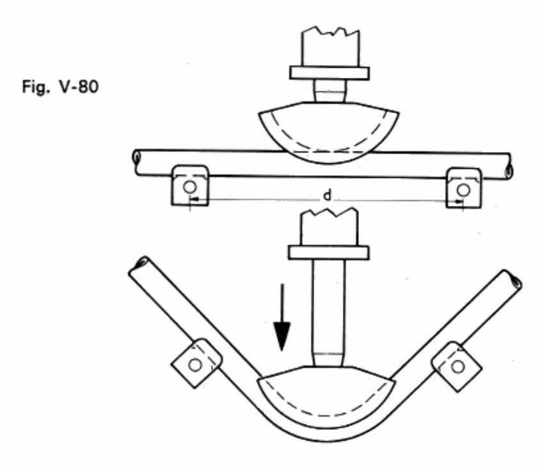
— *Le cintrage avec alliages à bas point de fusion* (*cerrobend*, par exemple, qui fond vers 72 °C) est analogue au cintrage à la résine. Le cerrobend permet de faire plus facilement des coudes à rayons de courbure faibles ; ils sont moins déformés qu'avec le sable ou la résine. Cependant, c'est un alliage cher et il a l'inconvénient de laisser une pellicule sur la paroi intérieure du tube.

Dans tous les cas, un martelage est souvent nécessaire pour corriger l'ovalisation engendrée par le cintrage.

11.3. Cintrage à la machine

11.3.1. Machines à cintrer à vérin. — Le tube, prenant appui sur deux butées pivotantes, est cintré par flexion sous l'action d'un sabot actionné par un piston (fig. V-80).

Fig. V-80



Le sabot cintreur, qui présente une gorge torique, maintient le tube sur la moitié de sa section environ et s'oppose à l'élargissement du diamètre. Ainsi est évité l'aplatissement du tube. La distance *d* des axes des butées pivotantes est réglé en tenant compte des rayons de cintrage à obtenir.

Les machines de ce type sont utilisables pour des tubes de 15 à 100 mm de diamètre ; les rayons de cintrage qu'elles permettent d'obtenir, avec les tubes de plus grands diamètres, sont limités à des rayons compris entre 4 et 8 fois le diamètre du tube. Chaque sabot ne permet d'obtenir qu'un seul rayon de cintrage pour un tube de diamètre déterminé. Cependant, l'angle de cintrage peut être quelconque : il suffit de faire varier la course du piston. Chaque machine peut être munie de sabots permettant le cintrage de tubes de diamètre inférieur à la capacité maximale.

Cette machine peut être équipée pour des travaux de série.

11.3.2. Presses à cintrer. — Le principe de base est le même que celui des machines à vérin (fig. V-81). Le sabot cintreur présente une gorge torique adaptée au diamètre du tube et au rayon de cintrage. Les matrices d'appui formant butées accompagnent le tube pendant le cintrage en exerçant une pression qui l'applique contre le

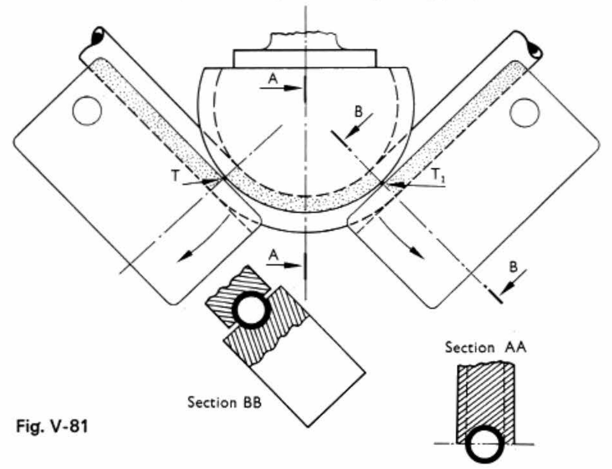
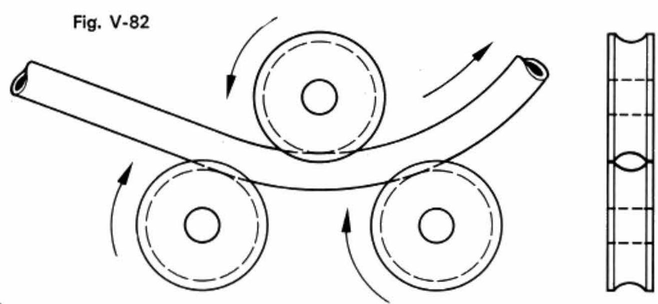


Fig. V-81

sabot. Pendant toute l'opération, le tube se trouve maintenu, d'une part, par la gorge du sabot (pour la moitié de la surface cintrée ou intrados) et, d'autre part, dans les gorges des matrices (parties rectilignes de chaque côté du coude). Aux points de tangence, à la naissance du cintrage, le tube se trouve ainsi maintenu sur toute sa surface extérieure. La course du piston, déterminée par une butée réglable, donne l'angle du coude. La plupart des presses de ce genre peuvent être équipées de butées multiples offrant la possibilité d'exécuter une série de coudes différents sur un même tube selon un programme pré-établi. Ces machines présentent l'avantage d'être rapides et sont utilisées pour les travaux de série.

11.3.3. Presses à cintrer à trois galets. — Comme les cintreuses à vérin et les presses à cintrer décrites précédemment, elles permettent de réaliser un cintrage par flexion, entre deux appuis. Une différence cependant les distingue : la rotation des galets permet le cintrage en continu, sur une longueur illimitée (fig. V-82). Le tube n'est pas

Fig. V-82



enveloppé dans une gorge comme dans le cintrage du vérin ou à la presse : il porte dans la gorge des galets, juste au point de tangence. Néanmoins, malgré ce faible guidage la section se déforme peu car les rayons de cintrage sont toujours très grands. Dans le plupart des machines, les trois galets sont moteurs.

Ce mode de cintrage a l'inconvénient de laisser subsister une partie droite à chaque extrémité de la barre.

Ce procédé convient pour les grands rayons de cintrage, sur de grandes longueurs, et pour les serpentins avec

adjonction d'un outillage supplémentaire. Cet outillage est constitué de rouleaux gauchisseurs montés de chaque côté des galets cintreurs ; ils agissent dans un plan perpendiculaire au plan de cintrage (fig. V-83). Chaque rouleau

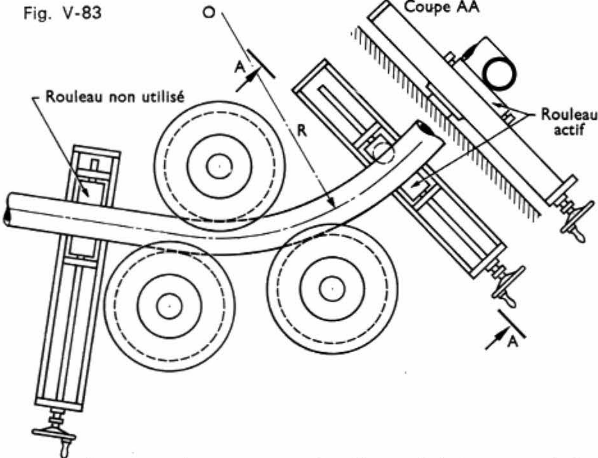


Fig. V-83

peut exécuter trois mouvements ; l'un axial, le second de rotation (rotation de l'ensemble du châssis) et le troisième en hauteur ; cela permet de faire varier le pas des serpentins. Selon les machines le plan de cintrage est soit horizontal, soit vertical. Il est souvent indispensable de soutenir le serpentin pendant le cintrage.

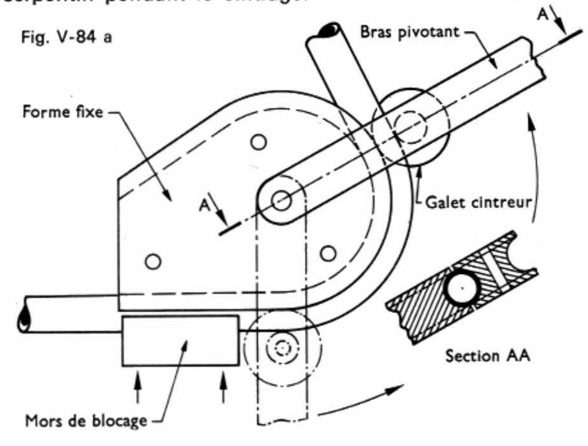


Fig. V-84 a

On peut exécuter des cercles complets, avec des tubes de petits diamètres : on fabrique un serpentin, à spires jointives et on coupe ensuite à la scie, à la longueur convenable.

11.3.4. Cintrage par enroulement et compression. — Le principe de ces machines est différent des précédents. Le cintrage n'est pas obtenu par flexion entre deux appuis ; le tube est bloqué énergiquement contre une forme fixe qui porte une gorge semi-torique aux dimensions du coude à exécuter et un galet cintreur cylindrique enroule le tube dans la gorge de la forme (fig. V-84 a). Parfois ce galet est remplacé par un simple patin (fig. V-84 b).

Dans certains cas, le galet cintreur a tendance à marquer le tube. On évite ce défaut en ajoutant, à l'avant du bras pivotant, un deuxième galet qui entraîne l'extrémité du tube (fig. V-85).

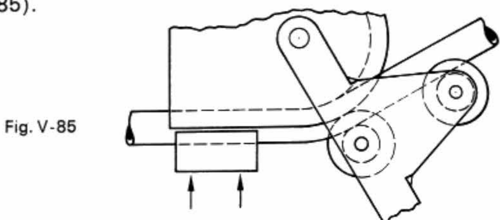


Fig. V-85

Cette méthode de cintrage a l'avantage de limiter l'amincissement de l'épaisseur du tube à l'extrados (extérieur du coude). En revanche, elle a des applications relativement limitées et ne peut convenir que pour les tubes de petits diamètres, d'épaisseurs moyennes et grandes, avec des rayons de cintrage supérieurs ou égaux à trois fois le diamètre du tube.

Sur ces machines, il est toutefois possible de cintrer des tubes minces, à la condition de les remplir de résine ou d'alliage à bas point de fusion.

11.3.5. Cintrage par enroulement et étirage. — Cette méthode de cintrage qui est la plus répandue permet d'exécuter des coudes dans les conditions les plus difficiles : tubes très minces et cintrage très court (rayon de cintrage égal au diamètre).

Les machines les plus simples sont équipées de trois outillages essentiels qui suffisent pour les tubes épais et pour les rayons de cintrage moyen ; une forme tournante, une mâchoire ou sabot de blocage, une glissière (fig. V-86). En tournant, la forme entraîne le tube et l'enroule dans sa gorge semi-torique. La glissière peut être fixe ou coulissante. La glissière fixe provoque un amincissement plus marqué à l'extrados. Inversement, la glissière coulis-

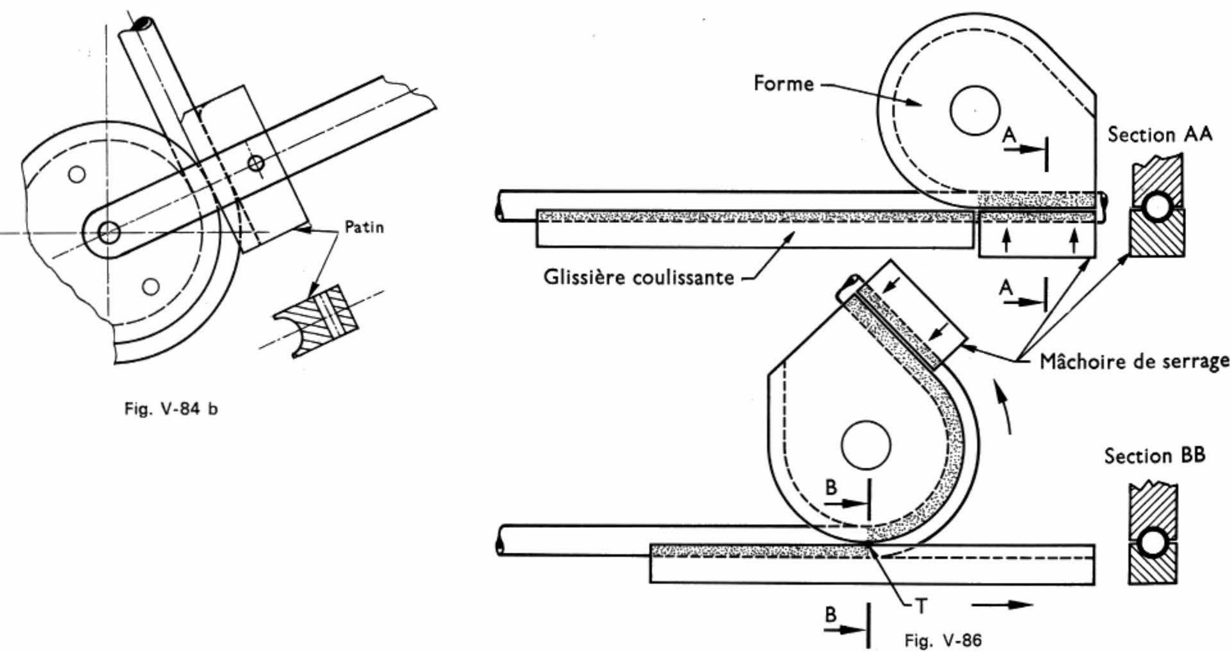


Fig. V-84 b

Fig. V-86

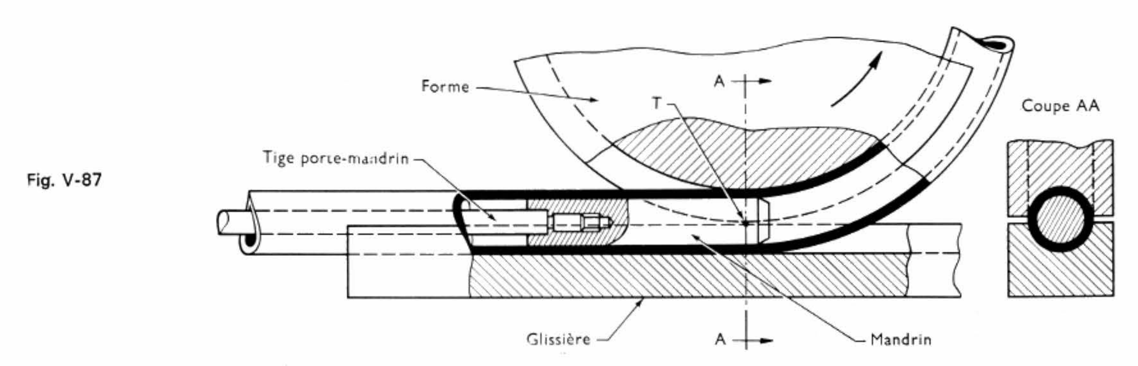


Fig. V-87

sante augmente les risques de plissage de l'intrados en diminuant l'amincissement de l'extrados.

L'originalité de ce procédé est de permettre des perfectionnements à l'aide des outillages suivants :

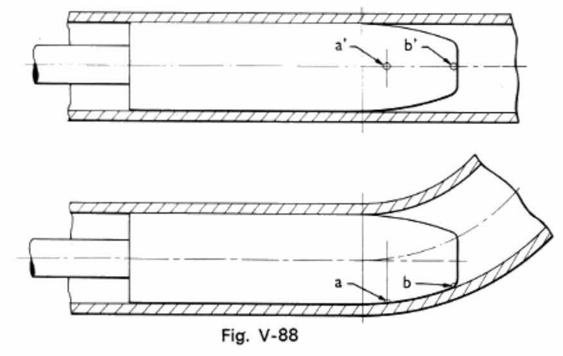


Fig. V-88

— Un *mandrin intérieur* peut s'opposer à la déformation de la section du tube en soutenant la paroi intérieure. Pendant le cintrage, le mandrin reste fixe et il est maintenu en place par une barre d'acier bloquée sur le bâti de la machine (fig. V-87). Pour les coudes de très faible rayon, sur tubes minces, on utilise des mandrins perfectionnés qui soutiennent les parois intérieures du tube de plus en plus loin dans la zone cintrée. Par exemple, le mandrin en forme d'ogive qui ne porte dans le tube que sur une génératrice *ab* (fig. V-88) et les mandrins articulés ou mandrins à billes qui permettent d'exécuter les coudes les plus difficiles. Le positionnement du mandrin par rapport à l'axe de la forme a une très grande importance.

— Une *contre-glissière ou efface-plis* permet d'éviter la formation de plis à l'intrados du tube dans le cas des tubes minces (fig. V-89 a et b) ;

— Des *mâchoires permettent d'exercer une poussée sur le tube.*

L'utilisation du mandrin et de la contre-glissière introduit des forces de frottement intenses malgré une lubrification appropriée. Pour éviter des déchirures de la paroi du tube, on réduit les efforts de traction par une poussée du tube à l'aide de mâchoires (fig. V-90).

Pour le cintrage des tubes soudés, on prévoit des rainures dans les outillages afin de permettre le passage des cordons de soudure intérieurs et extérieurs.

Ces dispositifs servent également pour le cintrage des tubes à sections carrées ou rectangulaires.

La commande des machines peut être effectuée manuellement ou au moyen de dispositifs électromécaniques, pneumatiques ou hydrauliques. Des machines à commande numérique sont utilisées pour les grandes séries ; elles ont l'avantage d'augmenter les cadences de production en garantissant l'exactitude des formes obtenues.

11.3.6. Cintrage au treuil. — Ce travail présente de grandes analogies avec le cintrage au marbre, à la main : l'effort du cintrage est exercé au moyen d'un treuil qui est utilisé pour tirer sur le tube par l'intermédiaire d'un câble.

On cintre surtout des tubes remplis de sable ; le cintrage est souvent exécuté à chaud.

Fig. V-89 a

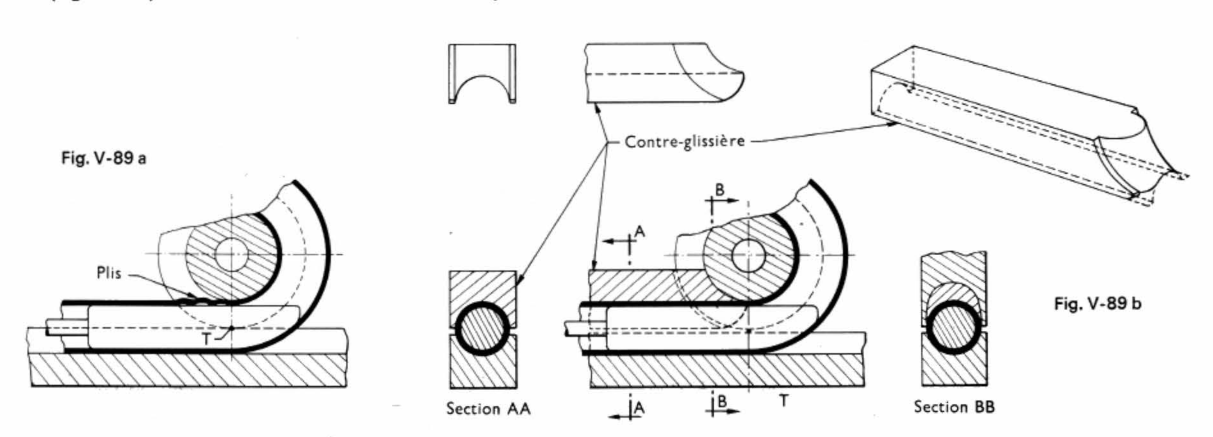
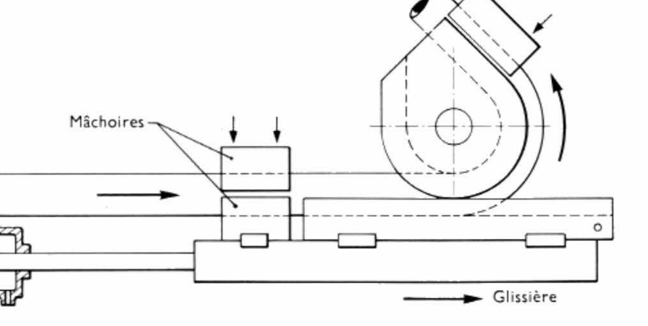


Fig. V-89 b

Fig. V-90



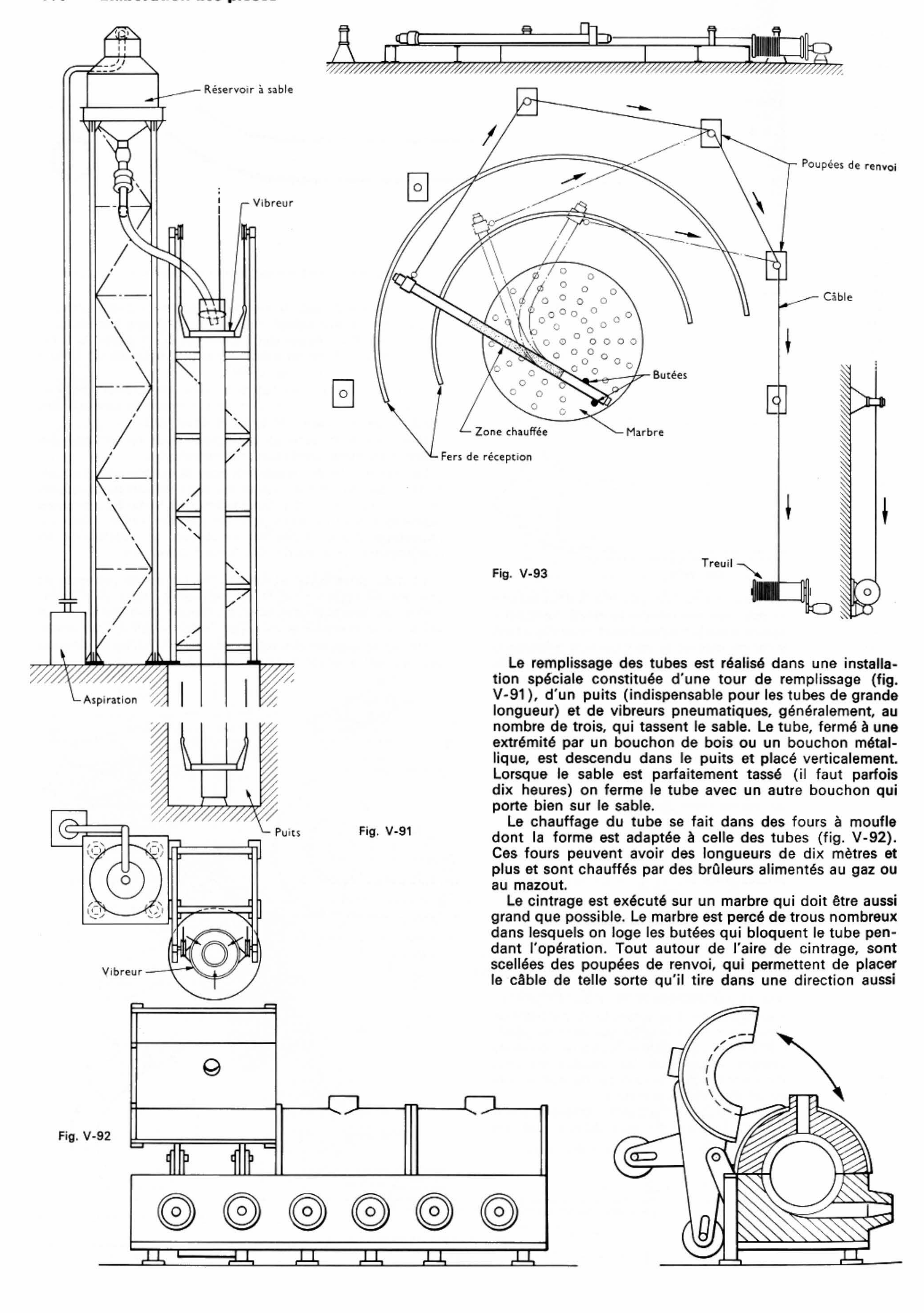


Fig. V-91

Fig. V-93

Fig. V-92

Le remplissage des tubes est réalisé dans une installation spéciale constituée d'une tour de remplissage (fig. V-91), d'un puits (indispensable pour les tubes de grande longueur) et de vibreurs pneumatiques, généralement, au nombre de trois, qui tassent le sable. Le tube, fermé à une extrémité par un bouchon de bois ou un bouchon métallique, est descendu dans le puits et placé verticalement. Lorsque le sable est parfaitement tassé (il faut parfois dix heures) on ferme le tube avec un autre bouchon qui porte bien sur le sable.

Le chauffage du tube se fait dans des fours à moufle dont la forme est adaptée à celle des tubes (fig. V-92). Ces fours peuvent avoir des longueurs de dix mètres et plus et sont chauffés par des brûleurs alimentés au gaz ou au mazout.

Le cintrage est exécuté sur un marbre qui doit être aussi grand que possible. Le marbre est percé de trous nombreux dans lesquels on loge les butées qui bloquent le tube pendant l'opération. Tout autour de l'aire de cintrage, sont scellées des poupées de renvoi, qui permettent de placer le câble de telle sorte qu'il tire dans une direction aussi

voisine que possible de la perpendiculaire au tube (fig. V-93).

Pour les gros tubes, le cintrage doit se faire vite car il n'est généralement pas possible de les remettre au four ni de les réchauffer au chalumeau. Ce cintrage peut être réalisé avec ou sans forme. Dans tous les cas, il nécessite une installation importante et du personnel qualifié.

12. TUYAUTERIES INDUSTRIELLES

12.1. Préfabrication en atelier. — Les contraintes de rentabilité obligent à une augmentation des tonnages mis en œuvre et à une diminution des temps de montage.

Généralement, les plans fournis par les clients sont en vues isométriques établies sur ordinateurs. À partir d'un isométrique, le préparateur élabore plusieurs documents: « une feuille débit » avec tous les renseignements nécessaires, « un plan de pièce dessinée » précisant les différentes phases de soudure, un « bon de sortie matière » après avoir constaté que tous les éléments sont disponibles pour éviter l'encombrement des ateliers, « un bon de travail » avec l'indication du délai de livraison et de l'urgence. Le bureau de préparation envoie le bon de sortie vers le magasin, un plan de la pièce vers le service de contrôle, tous les autres documents vers l'atelier.

La préfabrication par elle-même s'effectue à l'atelier avec tous les moyens techniques modernes: moyens de manutention nombreux, rapides et puissants, découpage et chanfreinage par machines automatiques, soudage par procédés semi-automatiques ou automatiques.

La dimension des tronçons de tuyauterie préfabriqués est limitée par les problèmes de manutention à l'intérieur de l'atelier et surtout par les limites d'encombrement (en longueur et en diamètre) et de charge des moyens de transport entre l'atelier et le lieu de montage final.

12.2. Montage sur chantier. — La mise en place des tronçons préfabriqués et leur maintien en position pendant les opérations de pointage et de soudage posent des problèmes de manutention, de levage et de calage complexes et délicats. L'accessibilité des points à souder est souvent difficile: des échafaudages sont alors nécessaires.

LES ENTREPRISES

13. DES TECHNIQUES ET UNE INDUSTRIE

Malgré l'extrême diversité des produits relevant de la chaudronnerie, leur processus de fabrication comporte toujours l'application de techniques de découpage et de formage de produits métallurgiques minces (tôles et tubes), de techniques d'assemblage par soudage et, dans le cas de produits de très grandes dimensions, de techniques de manutention particulières.

Les techniques de formage sont très spécifiques: elles déforment le métal (à froid ou à chaud) sans entraîner de modification notable de l'épaisseur ou de la section du produit initial.

C'est l'emploi commun de ces techniques qui caractérise les entreprises constituant l'industrie de la chaudronnerie.

Ces entreprises ne se différencient que par la capacité de leurs moyens de production et par la nature de leurs fabrications.

14. MOYENS DE PRODUCTION

Le secteur de la chaudronnerie est constitué d'une grande variété d'entreprises de toute importance, depuis l'artisan travaillant avec quelques compagnons jusqu'à la grande entreprise disposant d'ateliers de chaudronnerie, d'ateliers de mécanique et de personnel de chantier.

Tout atelier de chaudronnerie est équipé de moyens plus ou moins perfectionnés et puissants pour découper, former et souder les matériaux mis en œuvre.

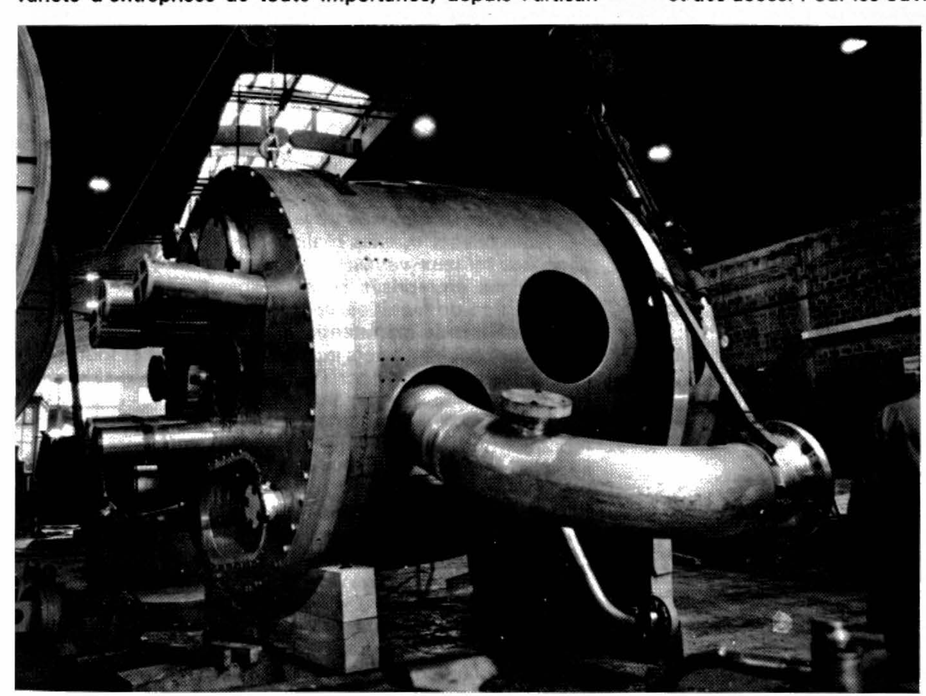
Les dimensions maximales des produits réalisables par une entreprise sont limitées:

— pour l'épaisseur: par les capacités des machines de formage et du matériel de soudage;

— pour les dimensions extérieures: par la surface des aires de montage et la hauteur libre (sous plafond ou sous crochet);

— pour la masse: par la capacité de levage des moyens de manutention.

L'implantation des postes de travail dans l'atelier conditionne les dimensions extérieures maximales des composants des ouvrages et leurs possibilités de déplacement en vue de leur assemblage. Les dimensions extérieures des ouvrages terminés (ou de leurs parties non démontables) sont également conditionnées par les dimensions des portes et des accès. Pour les ouvrages de grande taille la tendance



Réalisation de matériel spécialisé aux formes très précises (*Fontana-Thomasset*)



Montage d'un appareil sur le chantier (*Chaudronnerie des Roches*)

est de préfabriquer des éléments en atelier et de réaliser les opérations d'assemblage sur chantier après montage « à blanc ».

La présence de machines de mécanique (perceuses radiales, raboteuses, tours verticaux, aléseuses) donne des possibilités de fabrication de chaudronnerie de précision ou de chaudronnerie lourde devant satisfaire à des spécifications sévères en ce qui concerne les tolérances dimensionnelles ou les états de surface. Par leurs propres moyens certaines entreprises étudient et construisent des machines spéciales (souvent réalisées à partir d'adaptations de machines classiques) pour l'exécution de travaux particuliers ainsi que des outillages et des équipements pour faciliter les opérations d'assemblage par soudage semi-automatique ou automatique.

15. NATURE DES FABRICATIONS

15.1. Complexité des fabrications. — Elle varie selon le type des travaux exécutés par l'entreprise.

— *Travaux élémentaires :* ils sont limités à de simples opérations de découpage et de formage. Ces entreprises sont souvent des sous-traitants et fournissent à leurs clients des *composants,* tels que des fonds formés standards, des viroles ou des pièces de forme pour bâtis et ossatures.

— *Travaux standards :* l'entreprise fabrique en général un seul produit dans une gamme de dimensions standardisées (citernes à mazout, réservoirs de carburant, réservoirs d'air comprimé, éviers en acier inoxydable, matériels de laboratoire ou certains produits de tôlerie comme les meubles métalliques ou les portes de wagons). Ces produits sont vendus sur catalogue et étudiés par le constructeur.

— *Travaux sur plan du client :* la plupart des petites et moyennes entreprises travaillent selon des plans établis par leurs clients et elles réalisent des matériels très divers dans des métaux variés.

Certaines entreprises se sont spécialisées soit dans la construction de matériels spécifiques (échangeurs de chaleur, matériels de manutention) soit dans la mise en œuvre de métaux nobles (aciers inoxydables, titane) et fournissent essentiellement des appareils pour les industries chimiques, pharmaceutiques ou alimentaires.

— *Travaux sur plans d'ingénierie :* quelques entreprises fabriquent des appareils particulièrement élaborés qui font appel à des techniques de pointes pour résoudre les problèmes que posent leurs conditions d'emploi (cryogénie, hautes températures, domaine nucléaire, astronautique). Il s'agit de matériels de haute technicité impliquant l'utilisation de matériaux nouveaux dont la mise en œuvre (découpage, formage, soudage) présente des difficultés et exige préalablement des études ou des recherches réalisées soit dans les laboratoires propres à l'entreprise, soit avec l'assistance des centres techniques spécialisés. Ces matériels impliquent également la maîtrise de moyens de contrôle perfectionnés (radiographie, ultrasons, test à l'hélium).

15.2. Importance des fabrications. — Il s'agit ici de l'importance des séries (nombre de pièces identiques) exécutées par l'entreprise.

— *Fabrications unitaires :* les entreprises sont polyvalentes (de la petite entreprise travaillant sur plans du client à l'entreprise fournissant une installation complète, raffinerie de pétrole, par exemple) ou spécialisées. Cette spécialisation concerne soit un domaine de clientèle (industrie alimentaire), soit un type de fabrication (travaux unitaires utilisant des éléments standards comme en tuyauterie), soit un procédé de fabrication propre à l'entreprise.

— *Fabrication de série :* les entreprises fabriquent des produits vendus sur catalogue ou entrant comme sous-ensembles dans d'autres produits de grande série. Le processus de fabrication préétudié est soit déclenché à chaque commande (chaudières industrielles, citernes routières) soit continu (citernes à mazout à usage domestique, petits réservoirs d'air comprimé pour poids lourds).

CHAPITRE VI

FORGEAGE AU MARTEAU

1. GÉNÉRALITÉS SUR LA FABRICATION DES PIÈCES DE FORGE

1.1. Définition. — Le forgeage au marteau, appelé également **forgeage libre**, est une opération de conformation à chaud effectuée en vue d'obtenir, à partir d'un lingot, une pièce de forme déterminée possédant une compacité et une homogénéité supérieures à celles du métal coulé. Les engins utilisés à cet effet agissent, soit par pression, soit par percussion. Les premiers sont les presses hydrauliques, les seconds les marteaux-pilons.

Le forgeage au marteau diffère de l'estampage ou matriçage qui déforme le métal à l'intérieur de matrices reproduisant en creux la forme de la pièce. Dans le forgeage libre les parties en contact direct avec la pièce, qui portent le nom de **marteau** et d'**enclume,** ont une forme géométrique simple.



Fig. VI-1 — Lingot en acier, de 190 t (*Creusot-Loire*)

1.2. Produit de départ. Lingot. — Le lingot est coulé à partir d'un ou plusieurs fours de fusion dans un récipient en fonte appelé **lingotière.** La masse d'un lingot, qui est comprise entre quelques kilogrammes et plusieurs centaines de tonnes, est fonction de celle de la pièce à forger. La figure VI-1 représente un lingot en acier, de grandes dimensions, (masse : 190 t), destiné à la fabrication d'une pièce de forge importante (rotor de turbine).

L'extrémité pied du lingot se termine par une partie cylindrique — appelée **bain de pied** — de faible diamètre, destinée à recevoir les éclaboussures du jet de métal liquide qui rebondit sur le fond nu de la lingotière au début de la coulée. L'extrémité tête est constituée par une partie volumineuse de forme tronconique appelée **masselotte.** Elle comporte une cavité en forme d'entonnoir appelée *retassure principale*, qui résulte d'une diminution du volume de l'acier intervenant au moment de la solidification. Elle contient également les impuretés qui se rassemblent au sommet du lingot.

Les extrémités tête et pied sont éliminées pendant le forgeage après avoir servi à l'amarrage au cours des premières opérations. Le reste du lingot représente ainsi la partie utile du métal coulé. Bien que débarrassé des impuretés et inclusions les plus importantes rassemblées à la tête et au pied, il est affecté de certaines faiblesses que l'opération de forgeage a pour rôle d'éliminer. Ces faiblesses sont constituées :

— de cavités fermées, appelées **retassures secondaires** (fig. VI-2), alignées le long de l'axe du lingot ; elles

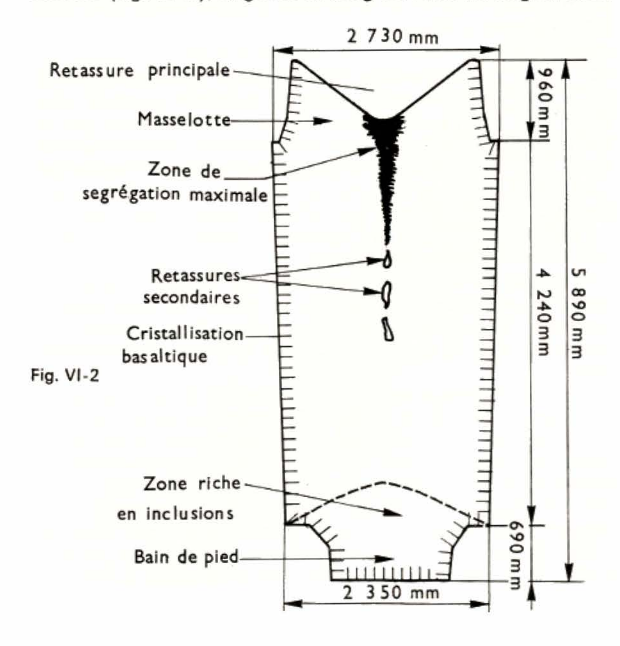


Fig. VI-2

résultent de contractions d'origine thermique intervenant en cours de refroidissement;

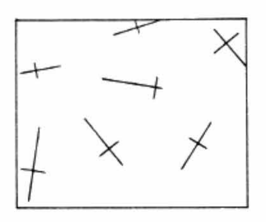
— de petites porosités ou **soufflures** disséminées dans la masse du lingot, provoquées par des dégagements gazeux intervenant lors de la solidification;

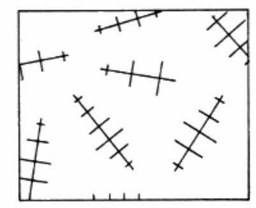
— de **ségrégations** marquées par des différences de composition chimique:

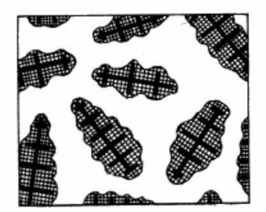
a) à l'échelle des cristaux (ségrégation mineure);

b) à l'échelle du lingot (ségrégation majeure).

La ségrégation mineure s'explique par le mode de croissance des cristaux formés à partir de germes de solidification. Les germes sont constitués de métal pauvre en carbone et en impuretés, dont les plus importantes sont le soufre et le phosphore. La teneur du métal en carbone et en impuretés s'élève ainsi au fur et à mesure que l'on s'éloigne du germe pour devenir maximale le long des zones formant la jonction des cristaux appelées **joints** (fig. VI-3).







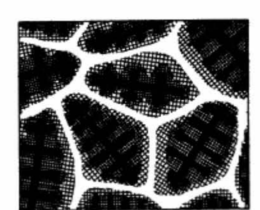


Fig. VI-3

La ségrégation majeure est représentée par la différence de composition entre les zones extérieures et la partie axiale du lingot. Elle résulte du déplacement du métal liquide repoussé au cours de la croissance des cristaux vers l'axe et la tête du lingot, parties solidifiées en dernier. L'axe et la tête du lingot se trouvent ainsi enrichis en carbone et en impuretés dont ce métal est chargé.

Les cristaux proches de la peau des lingots sont allongés et orientés perpendiculairement à la surface (V. fig. VI-2). Ils constituent la **zone basaltique.** Au début du forgeage ces cristaux présentent une tendance à la décohésion, le long des joints plus riches en impuretés; cela donne naissance à des criques superficielles si l'opération n'est pas conduite avec précaution.

1.3. Transformation du lingot. Ébauchage et finition. — Le forgeage soumet le métal porté à une température suffisante, à un écrasement provoqué par le mouvement du marteau en direction de l'enclume. La température optimale de forgeage de l'acier est voisine de 1 200 °C. Elle varie, comme la température de fusion, en sens inverse de la teneur en carbone, passant de 1 350 °C à 1 050 °C lorsque cette dernière s'élève de 0,10 % à 1,50 %.

En raison de sa durée, l'opération de forgeage s'accompagne d'un refroidissement de la pièce; la température minimale à laquelle l'opération doit être arrêtée est voisine de 800 °C pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

Lorsque la teneur en éléments d'addition augmente, le forgeage devient plus difficile. Certains éléments, tels que le molybdène et le tungstène, qui améliorent la tenue de l'acier aux températures élevées, diminuent l'intervalle de température à l'intérieur duquel le forgeage peut être exécuté. Les températures minimales de forgeage des alliages très réfractaires sont comprises entre 800 et 1 000 °C, ce qui réduit l'intervalle de température de 400 à 200 °C et même dans certains cas particuliers à 100 °C.

Températures de forgeage de quelques métaux et alliages non ferreux:

Titane	950 °C à 850 °C
Cuivre	900 °C à 750 °C
Laiton forgeable	750 °C à 550 °C
Aluminium	500 °C à 300 °C
Duralumin	420 °C à 300 °C
Magnésium	autour de 350 °C

La résistance qu'oppose le métal aux efforts exercés par les outils à la température de forgeage conditionne également le déroulement d'une opération. Cette résistance augmente avec la vitesse de la déformation. Elle est d'autant plus grande que l'acier est plus allié. À titre d'exemple, la résistance des aciers inoxydables à teneur élevée en nickel et chrome est trois à quatre fois supérieure à celle des aciers au carbone.

Le but du forgeage consiste à:

— provoquer la disparition de la zone basaltique, des dendrites et des cavités fermées (retassures secondaires, soufflures) affectant le métal du lingot dont les bords parviennent à se souder sous l'effet des efforts appliqués;

— atténuer les hétérogénéités de composition chimique (ségrégation mineure);

— conférer à la pièce une forme extérieure aussi voisine que possible de celle définie par le dessin afin de limiter les opérations d'usinage.

Les deux premières conditions sont satisfaites à l'issue d'une phase préliminaire appelée **ébauchage.** La forme extérieure de la pièce est obtenue au cours d'une deuxième phase appelée **finition.**

1.3.1. Ébauchage. — Les efforts exercés par le marteau et l'enclume à la surface de la pièce se traduisent par une pression égale au quotient de la force appliquée et de la surface de contact entre l'outil et la pièce. Cette pression permet au marteau et à l'enclume de pénétrer à l'intérieur de l'ébauche en réduisant localement sa section (fig. VI-4). La zone comprimée subit un allongement dans le sens de l'axe; les parties échappant à l'emprise des outils sont repoussées vers les extrémités.

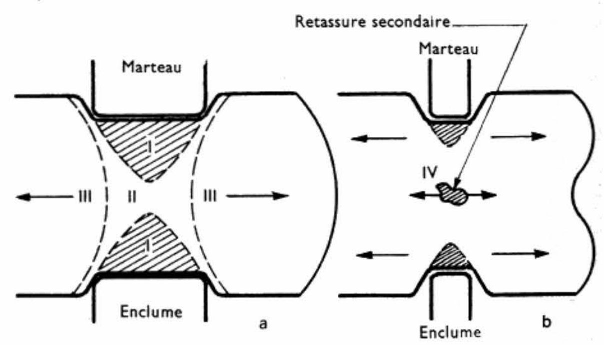


Fig. VI-4 — Effet de la largeur des outils sur la déformation en profondeur: I zones en compression; II zone de glissement des couches de métal; III zones repoussées; IV zone en traction

Les hétérogénéités chimiques liées à la formation des cristaux de solidification ainsi que les inclusions toujours présentes dans l'acier tendent alors à s'aligner dans le sens de l'allongement du métal en donnant naissance à la **fibre.**

L'expérience a montré que la transformation du métal du lingot en métal forgé — marquée par la disparition des dendrites et des cavités internes — peut être considérée comme acquise lorsque le rapport de la section initiale à la section finale, appelé **corroyage,** est voisine de 3 à 4. Mais ce résultat suppose que la déformation est homogène dans tout le volume de la zone comprimée, ce qui n'est pas réalisé dans la pratique.

En effet, des efforts de frottement considérables, résultant des pressions exercées par le marteau et l'enclume, interdisent le glissement du métal de la pièce contre la surface des outils ainsi que sa libre déformation à l'intérieur de deux zones de forme approximativement conique (zones I) dont la base coïncide avec la surface de l'outil.

Les deux cônes qui constituent chacun une zone plus ou moins rigide à l'intérieur de la pièce pénètrent, à la manière de coins, dans le métal environnant.

Ce dernier, représenté par la zone II, subit alors des déformations consistant en glissements des couches de métal les unes contre les autres et le long des coins. Ces glissements, qui doivent s'effectuer sans décollement ni fissuration, sont analogues à ceux de la pâte à modeler. Le malaxage qui en résulte provoque la fermeture des cavités et confère au métal les propriétés recherchées. Si les sommets des deux cônes sont suffisamment proches l'un de l'autre (fig. VI-4 a), le malaxage intéresse le cœur de la pièce et les retassures secondaires sont éliminées. Si les sommets des deux cônes restent éloignés l'un de l'autre (fig. VI-4 b), la zone axiale n'est pas déformée. Les retassures secondaires ne peuvent alors se refermer. Elles manifestent au contraire une tendance à s'agrandir sous l'action des efforts de traction qu'exercent les zones voisines soumises à la déformation.

Tableau I (*)

Puissance de la presse (10^3 daN)	Lingot	
	Diamètre (millimètres)	Masse brute (tonnes)
3 000	1 500	60
5 000	2 200	100
7 000	2 500	200
12 000	2 800	250
15 000	3 100	300

(*) Relation approximative entre la force de la presse, le diamètre et la masse maximale du lingot le plus important forgé sur cette presse.

La profondeur des cônes dépend de la surface du marteau et de l'enclume en contact avec la pièce ainsi que de la pression exercée. Elle est donc fonction de la force de la presse qui doit ainsi être adaptée aux dimensions du lingot. Le tableau I indique des diamètres de lingots correspondant à certaines forces de presse. Les chiffres de ce tableau sont donnés à titre indicatif. Ils peuvent en effet varier dans d'assez larges proportions en fonction de la technique de forgeage. En particulier la forme des outils exerce une influence sur les résultats de l'opération.

Les outils plats constituent la solution la plus simple. Leur emploi est indispensable lors du forgeage de pièces à section parallélépipédique. Ils sont également adaptés à la fabrication de pièces à section circulaire. Il suffit de communiquer à l'ébauche des mouvements de rotation et de translation conjugués avec les déplacements du marteau en vue de permettre à la totalité de la surface de la pièce de subir l'action des outils.

D'autres formes d'outils deviennent cependant nécessaires lors de l'ébauchage de lingots de grande section. En effet, l'emploi d'outils plats provoque un *élargissement* (fig. VI-5) d'autant plus accentué que la surface de contact de l'outil et de la pièce est plus importante. Cet élargissement fait naître des efforts de traction transversaux qui favorisent l'agrandissement des cavités axiales.

L'utilisation d'étampes enveloppantes de forme circulaire permettrait de résoudre le problème de l'élargissement s'il n'imposait des changements fréquents d'outillage au fur et à mesure de la réduction de section de la pièce. On préfère employer des outils en forme de V, d'angle au sommet voisin de 120° et de fond arrondi, qui tendent à épouser la forme extérieure de la pièce. On peut, suivant les cas, associer une enclume en V à un marteau plat (fig. VI-6) ou utiliser un marteau et une enclume, tous deux en forme de V (V. hors-texte).

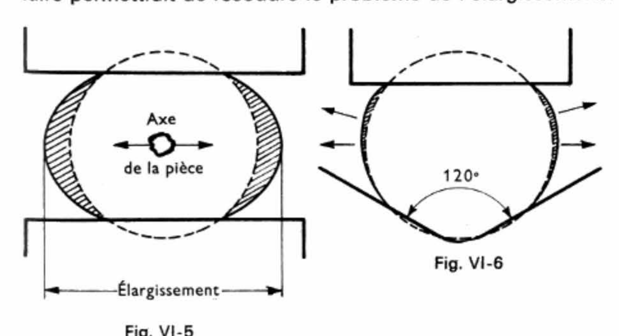


Fig. VI-5

Fig. VI-6

— **Étirage.** — L'opération consistant à réduire la section d'une pièce en augmentant sa longueur par une succession de coups de marteau porte le nom d'*étirage* (fig. VI-7). Le corroyage du métal de la pièce est égal au rapport des deux sections $\frac{S_0}{S_1}$. (S_0 : section initiale, S_1 : section finale).

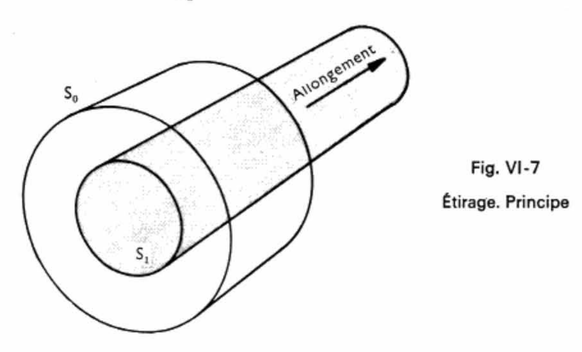


Fig. VI-7
Étirage. Principe

Une nouvelle opération réduisant la section à S_2 fait apparaître un nouveau corroyage égal à $\frac{S_1}{S_2}$.

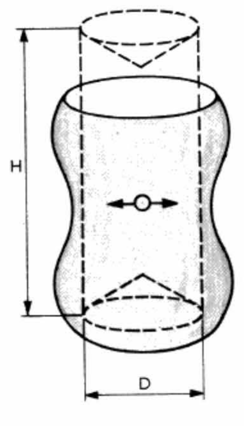
Le corroyage total est :

$$\frac{S_0}{S_2} = \frac{S_0}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S_2}$$

Le corroyage d'étirage d'une pièce de forge s'obtient en faisant le produit des corroyages appliqués au cours d'opérations partielles.

— **Refoulement.** — En dehors des opérations d'étirage, l'ébauchage peut également comporter une ou plusieurs opérations de refoulement associées chacune à une nouvelle opération d'étirage. Cette pratique devient nécessaire lorsque le rapport de la section du lingot à celle de l'ébauche est trop faible pour permettre d'appliquer le corroyage désiré au cours d'un simple étirage. Le refoulement permet ainsi d'utiliser un lingot adapté à la masse de la pièce sans se préoccuper de sa section, ce qui procure une économie de métal, moyennant un travail de forge supplémentaire.

Après un premier étirage, simplement destiné à donner à l'ébauche une forme cylindrique et à supprimer la cristallisation basaltique du lingot, on effectue un refoulement qui comporte une diminution de la hauteur et une augmentation de la section. Il convient d'éviter une déformation par flexion (flambage) et de réaliser une pièce qui ait la forme d'un tonneau et non celle d'un diabolo. On évite ainsi l'apparition, dans la zone axiale, d'efforts de traction provoquant l'agrandissement des cavités (fig. VI-8). Le



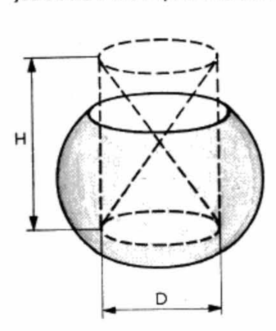
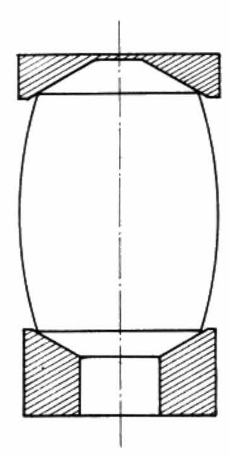


Fig. VI-8 — Refoulement : l'éloignement des deux cônes en compression entraîne un effort de traction horizontal préjudiciable à la compacité de la zone axiale



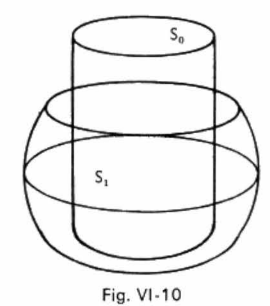


Fig. VI-10

Fig. VI-9 — Outils de refoulement enserrant une pièce

rapport hauteur/diamètre de l'ébauche ne doit ainsi pas être trop grand au début du refoulement.

Des outils de forme concave (fig. VI-9), aptes à retenir le métal des extrémités, peuvent être utilisés en vue de reporter la déformation vers la section située à égale distance des extrémités.

L'écrasement nécessite l'application d'un effort de 1 à 2 daN/mm². Les presses de très grande puissance ont été conçues en vue des opérations de refoulement.

Le refoulement est suivi d'un nouvel étirage comportant une forte pénétration des outils et l'application d'une grande pression en vue d'agir au maximum sur la zone axiale. La consolidation de cette zone, marquée par la suppression des défauts dont elle est affectée, peut exiger plusieurs opérations successives d'étirage et de refoulement.

Le corroyage, lors d'une opération de refoulement, s'obtient en faisant le rapport $\frac{S_1}{S_0}$ qui serait égal à celui des longueurs $\frac{l_0}{l_1}$ si la pièce conservait la forme d'un cylindre (fig. VI-10). Le corroyage total d'un métal ayant subi une succession d'opérations d'étirage et de refoulement est le produit des corroyages relatifs à chacune des opérations.

On se contente souvent de calculer le corroyage total en effectuant seulement le produit des corroyages correspondant aux opérations d'étirage et en négligeant les refoulements.

— **Élimination de la zone basaltique.** — Il a été indiqué que le début de l'ébauchage devait être conduit en vue de provoquer la disparition de la zone basaltique. L'ensemble des cristaux d'une section de pièce déformée par le forgeage donne naissance à de nouveaux cristaux, en principe plus fins que les premiers, et doués d'une meilleure cohésion. En raison de leur orientation, les cristaux de la zone basaltique manifestent une tendance plus marquée à la décohésion qui persiste tant que les nouveaux cristaux n'ont pas été formés. En vue d'éviter l'apparition de criques, la profondeur de pénétration doit être faible au début de l'ébauchage.

Les aciers austénitiques 18-8 et, d'une façon plus marquée encore, les aciers entièrement ferritiques à haute teneur en chrome, sont caractérisés par une zone basaltique très développée, particulièrement difficile à transformer. Certaines nuances d'aciers à outils à haute teneur en carbone nécessitent également des précautions poussées lors de la transformation de la zone basaltique. Cette transformation peut devenir tellement malaisée que les lingots destinés à la fabrication de pièces de forme simple — ronds ou barres rectangulaires — habituellement obtenues par laminage doivent commencer par être forgés avant de passer au laminoir dont l'action en surface est plus brutale.

Ce forgeage, qui s'effectue dans des intervalles très réduits de températures et implique de grandes précautions, exige une surveillance continue de la surface du métal en vue de l'élimination immédiate des criques susceptibles d'apparaître dans les angles dont le refroidissement est plus rapide.

Ces opérations peuvent éventuellement requérir l'emploi du marteau-pilon de préférence à la presse.

— **Élimination des défauts de surface.** — Les criques d'angle, apparaissant au cours du forgeage de petits lingots d'aciers spéciaux difficiles à transformer, peuvent être éliminées mécaniquement par un **goujage** effectué à chaud.

Les criques affectant les lingots de grandes dimensions ne peuvent être enlevées aussi simplement.

Il faut alors recourir au chalumeau décriqueur à l'oxygène, également utilisé pour terminer les chutages (fig. VI-11);

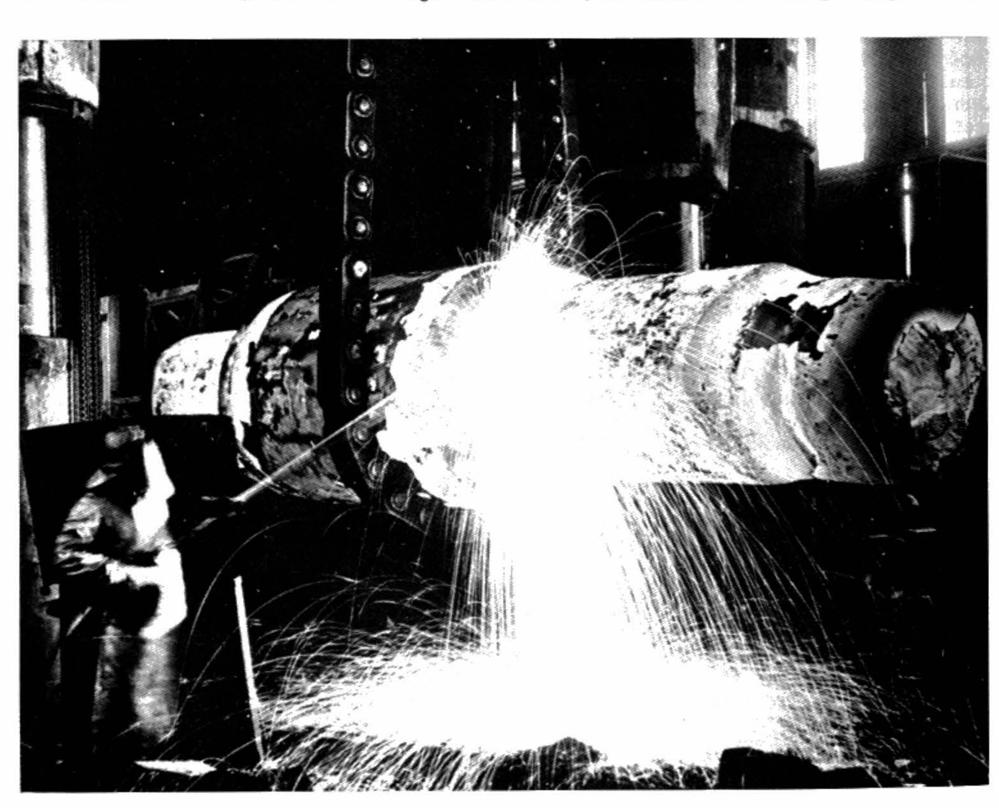
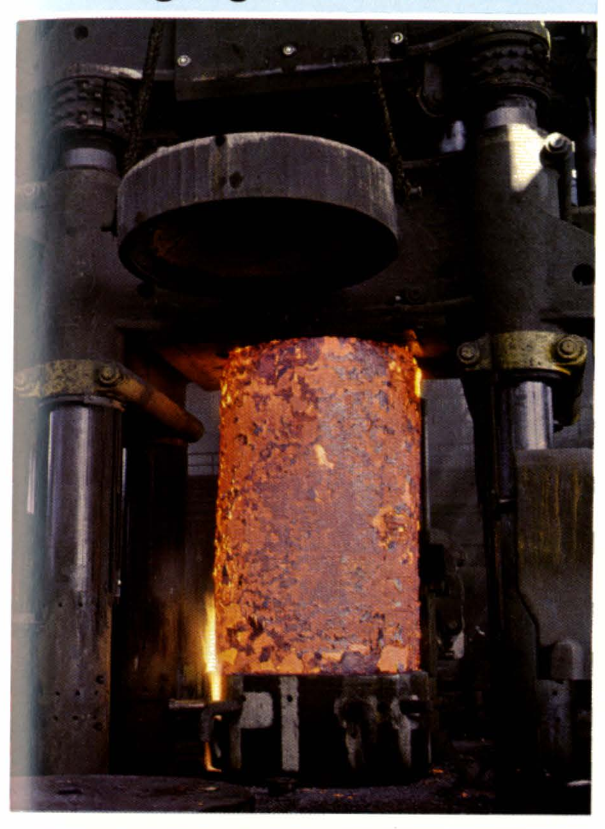


Fig. VI-11

Décriquage au chalumeau d'une ébauche en cours de forgeage (*Creusot-Loire*)

Forgeage au marteau

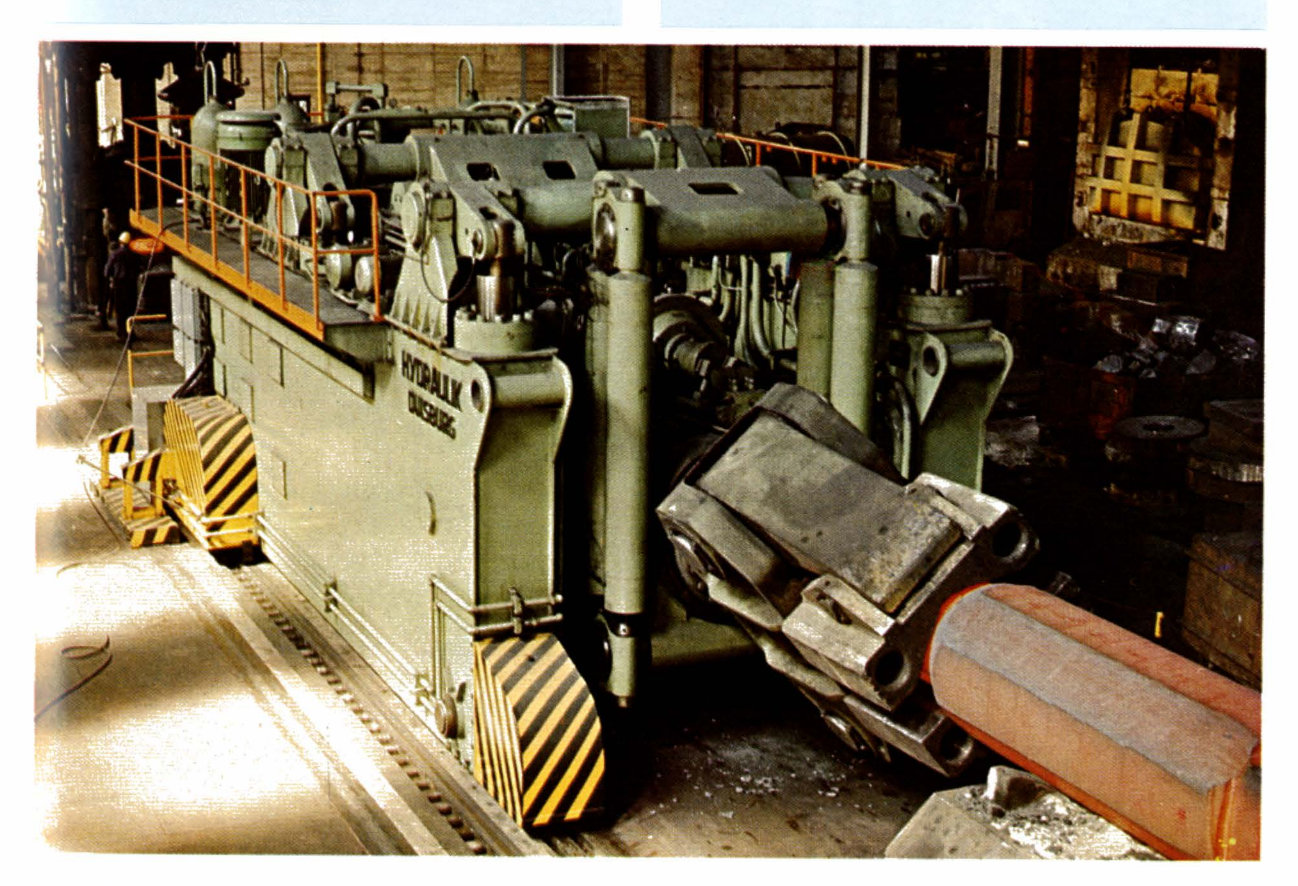


Ébauchage : 4[e] chaude ; refoulement au diamètre 2490 mm.



Ébauchage : 1[re] chaude ; 2[e] passe ; utilisation d'un marteau et d'une enclume tous deux en forme de V.

Manipulateur sur rails de 800 kN.m (80 t.m) ; charge 500 kN. La pièce en cours de forgeage repose sur l'enclume de la presse.



Photos : Creusot-Loire, Demag Hydraulik



Opération de cintrage à chaud exécutée sous la presse.

Augmentation progressive du diamètre de la couronne au cours de sa fabrication.

Photos : Schloemann, Dembiermont

il remplace les burins pneumatiques, les raboteuses et mortaiseuses utilisés autrefois pour les réparations de défauts de surface. Le chalumeau présente l'avantage considérable de permettre la réalisation immédiate de l'opération sans refroidissement de la pièce, éventuellement même sous la presse, moyennant une protection suffisante de l'opérateur contre le rayonnement du métal à haute température.

1.3.2. Finition. — La finition consiste à amener l'ébauche à des dimensions un peu supérieures à celles de la pièce à l'état d'utilisation.

La différence entre les cotes de la pièce finie de forge et celles de la pièce terminée constitue une surépaisseur éliminée ensuite par usinage. Cette surépaisseur, destinée à éviter que les irrégularités de la surface forgée ou d'éventuels défauts superficiels puissent affecter la pièce usinée, est fonction des dimensions de cette dernière; de 3 mm environ sur les petites pièces, elle atteint 30 mm et même davantage sur les pièces de grandes dimensions.

Le rôle des outils ne consiste plus à assurer la déformation **à cœur** du métal de la pièce mais à permettre l'exécution du travail en surface avec le maximum de commodité. De ce fait, la largeur des marteaux et enclumes utilisés au moment de la finition est sensiblement moins importante que celle des outils d'ébauchage; l'exécution des parties en creux s'en trouve facilitée.

Les outils en V ont un angle au sommet de 90°, les cônes de forgeage pouvant sans inconvénient être ramenés à des dimensions réduites (fig. VI-12). La réduction des surfaces de contact permet de travailler avec une plus grande rapidité.

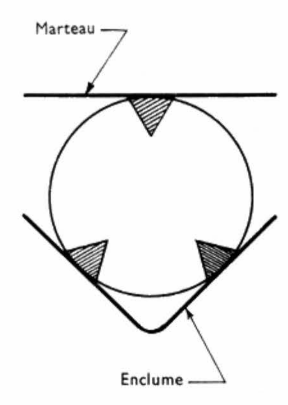


Fig. VI-12

Finition par étirage; on remarque la grande distance entre les zones en compression; cela n'entraîne pas d'inconvénient, une fois les manques de compacité axiaux éliminés par l'ébauchage

1.4. Réalisation de la forme de la pièce

1.4.1. Principaux types de pièces de forge. — On peut classer sommairement les pièces de forge de la façon suivante:

1° *Pièces de révolution forgées pleines, de forme simple*, telles que essieux, pignons, arbres, présentant des variations de section faibles ou progressives (fig. VI-13).

2° *Pièces de révolution forgées pleines, de forme plus compliquée*, telles que rotors de turbines et d'alternateurs, arbres à plateaux, cylindres de laminoirs, etc., comportant des tables et plateaux impliquant l'existence d'épaulements (fig. VI-14).

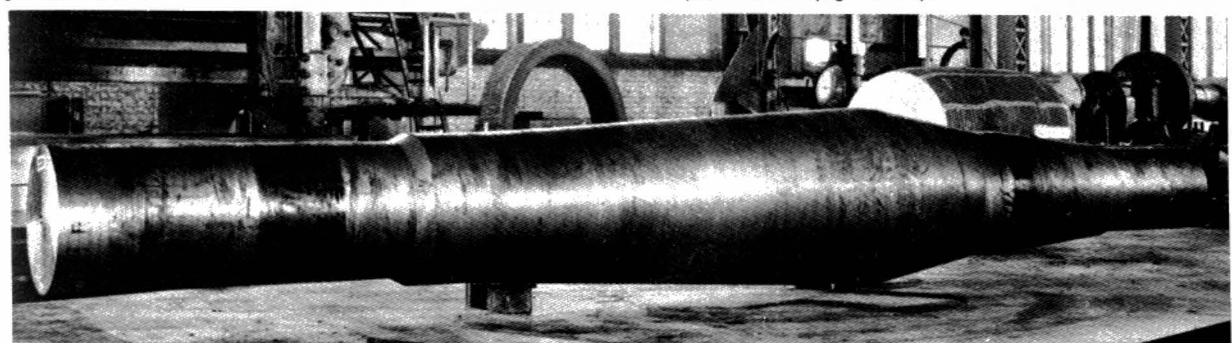


Fig. VI-13

Arbre de concasseur (*Creusot-Loire*)

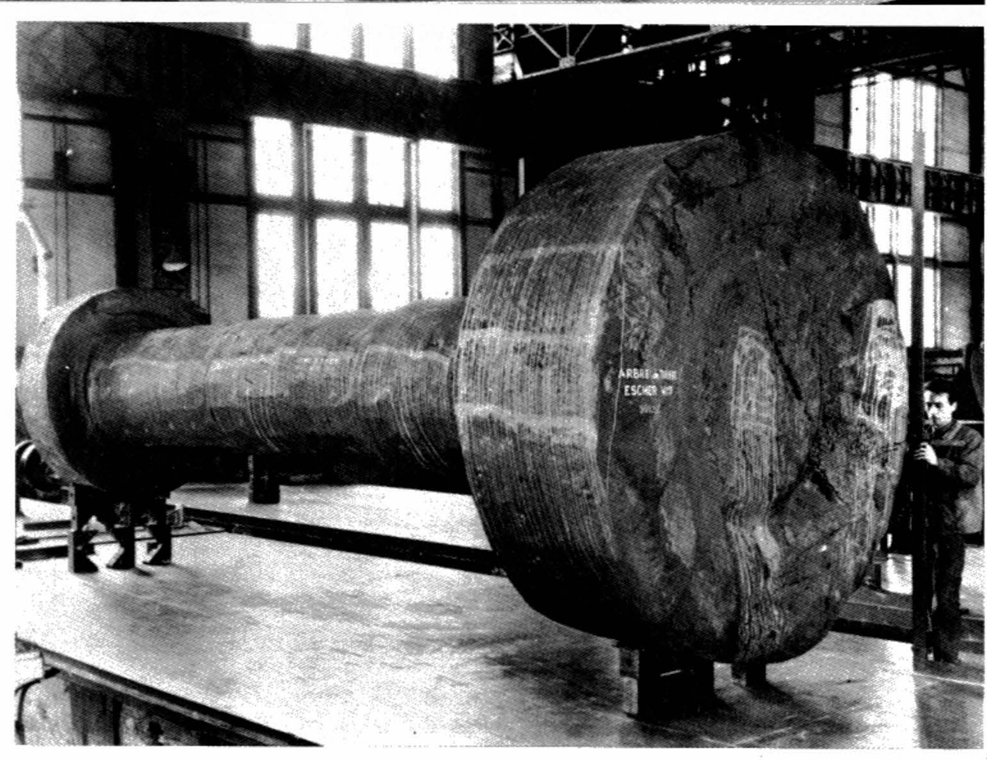


Fig. VI-14

Arbre de turbine hydraulique (*Creusot-Loire*)

3° *Pièces de révolution creuses* (réservoirs, couronnes) dont le forgeage nécessite l'emploi d'un mandrin cylindrique destiné à remplacer l'enclume devenue inopérante du fait du vide axial (fig. VI-15).

4° *Pièces de révolution plates* (disques) obtenues par écrasement d'une ébauche (fig. VI-16).

5° *Pièces dont le forgeage comporte une succession d'opérations* (*vilebrequins*) visant à déporter les manivelles par rapport à l'axe longitudinal de la pièce puis à leur donner un angle de calage voulu (fig. VI-17).

6° *Pièces de forme complexe* (mèches de gouvernail, boîtes à vapeur, crochets de levage, ancres, etc.) impliquant des opérations différentes dans les diverses parties de la pièce (fig. VI-18 et VI-19).

1.4.2. Opérations élémentaires. — La fabrication des pièces de forge comporte un certain nombre d'opérations élémentaires dont les plus courantes sont indiquées ci-après :

— *Étirage.* — Cette opération, citée à propos de l'ébauchage, consiste à réduire la section d'une pièce en augmentant sa longueur.

L'étirage constitue une opération d'ébauchage aussi bien que de finition. Dans ce dernier cas, sur les pièces cylindriques, l'étirage se termine par un « rondage » simplement destiné à régulariser l'état de surface.

— *Refoulement.* — L'opération de refoulement, qui est l'inverse de la précédente, a été également citée à propos de l'ébauchage.

Le refoulement, appelé aussi *écrasement*, peut constituer une opération de finition en vue de la fabrication de disques ou une opération intermédiaire consistant à réduire la hauteur de la pièce avant un perçage.

Le refoulement peut s'effectuer entre deux plaques (fig. VI-20) ou nécessiter l'emploi d'un marteau de largeur réduite qui permet d'appliquer une pression plus grande quand la surface à écraser devient trop importante pour la force de la presse (fig. VI-21).

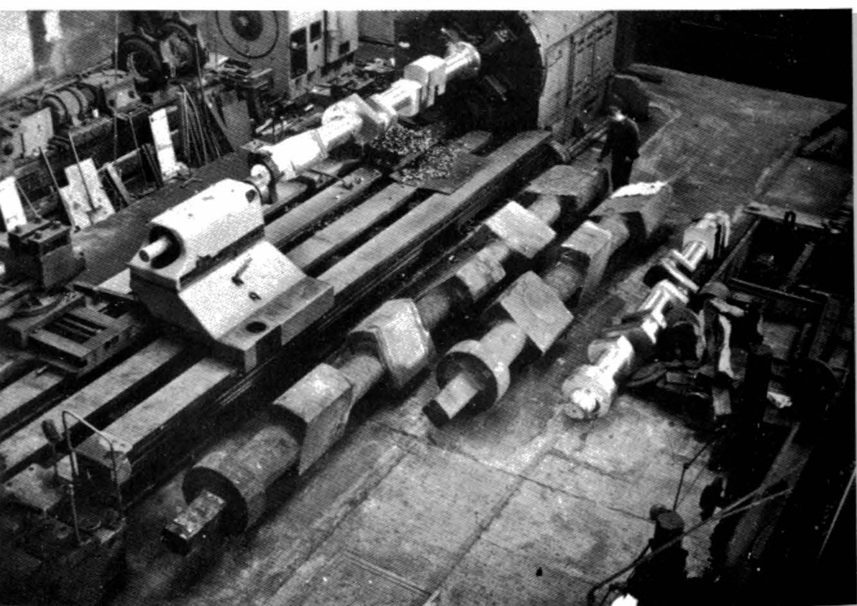


Fig. VI-15

Couronne de 4 950 mm
(*Photo Desmarez-Dembiermont*)



Fig. VI-16 — Disques (*Creusot-Loire*)



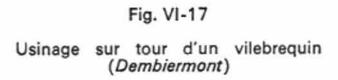


Fig. VI-17

Usinage sur tour d'un vilebrequin
(*Dembiermont*)

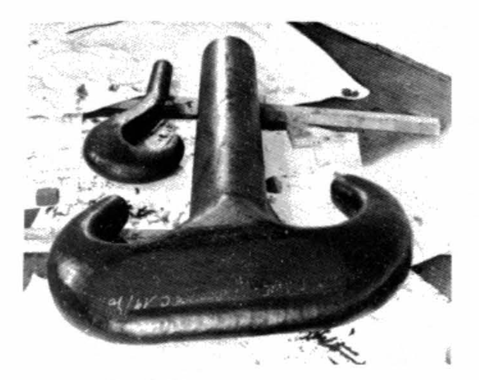


Fig. VI-18 — Ancre et crochet

(*Photo A. Velle-Dembiermont*)

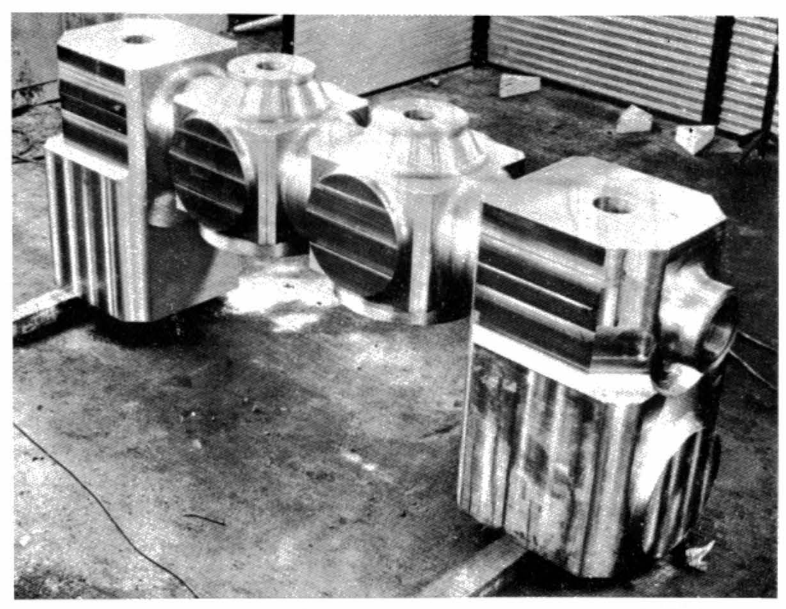


Fig. VI-19

Boîte de distribution de vapeur
(*Creusot-Loire*)

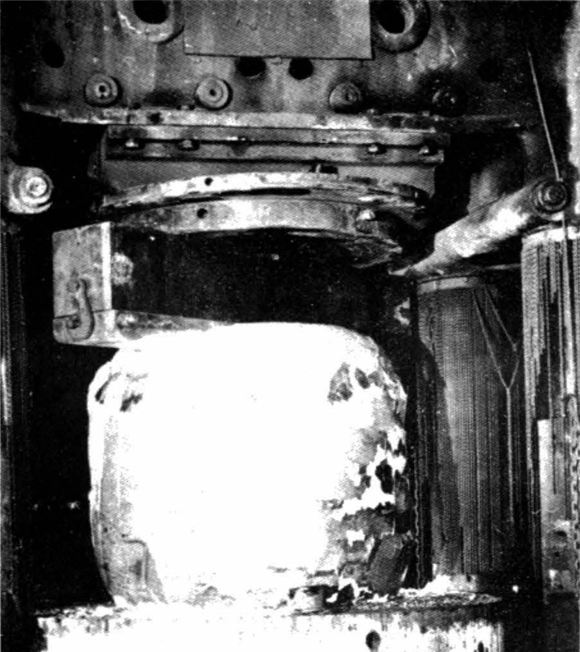


Fig. VI-21

Refoulement effectué à l'aide d'un marteau tournant (diamètre 3450 mm)
(*Creusot-Loire*)

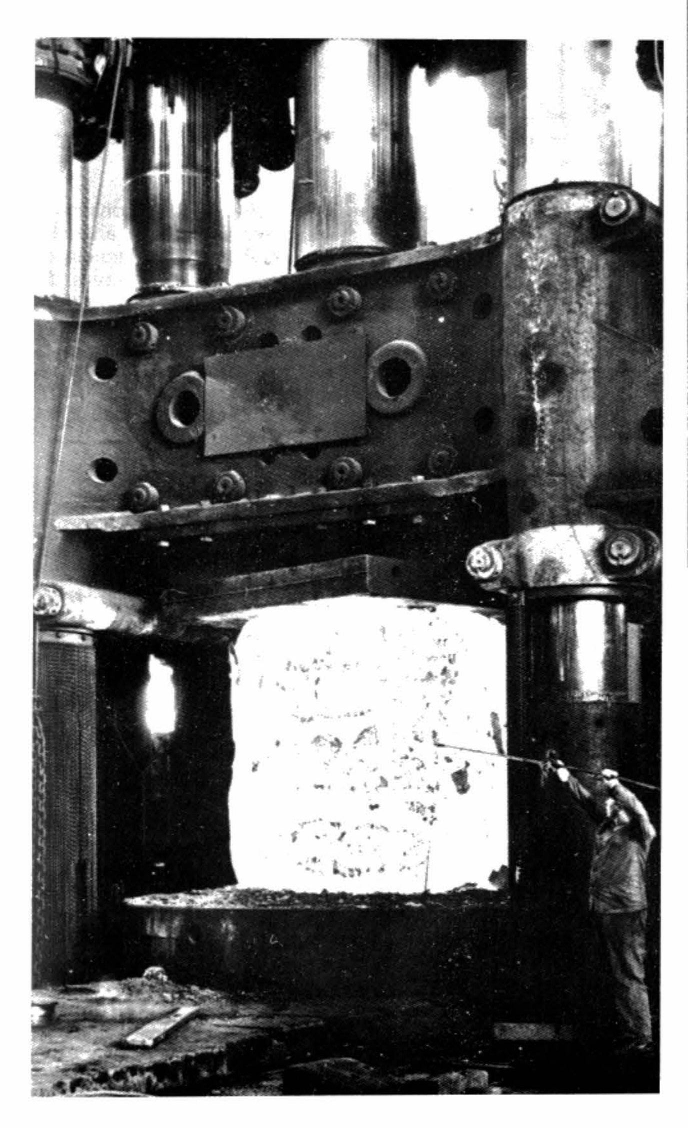


Fig. VI-20

Refoulement effectué entre plaques (diamètre 2250 mm)
(*Creusot-Loire*)

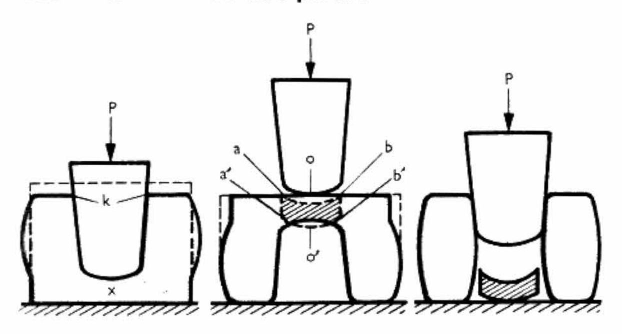
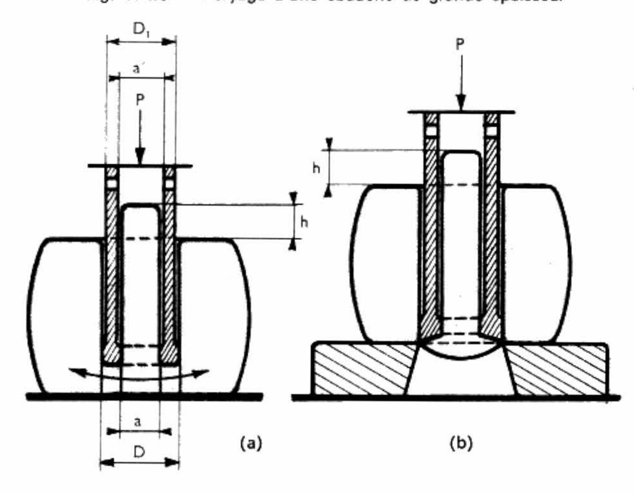


Fig. VI-22 — Perçage d'une ébauche de faible épaisseur

Fig. VI-23 — Perçage d'une ébauche de grande épaisseur



— *Perçage.* — Le perçage est une opération de préparation d'une ébauche destinée à la fabrication d'un corps creux. Il est réalisé de part en part si la pièce finie est une virole ou une couronne. Au contraire, il laisse subsister une certaine épaisseur de métal en tête du poinçon lorsque la pièce finie est une bouteille. Dans le premier cas, le perçage est suivi d'un forgeage sur mandrin, d'un bigornage ou des deux opérations. Dans le deuxième cas, il est suivi d'un tréfilage.

Le perçage d'ébauches de faible épaisseur ou d'ébauches destinées à être tréfilées se fait à l'aide d'un poinçon plein (fig. VI-22). Le perçage d'ébauches de grande épaisseur est effectué à l'aide d'un poinçon tubulaire dont l'extrémité est coupante (fig. VI-23 a).

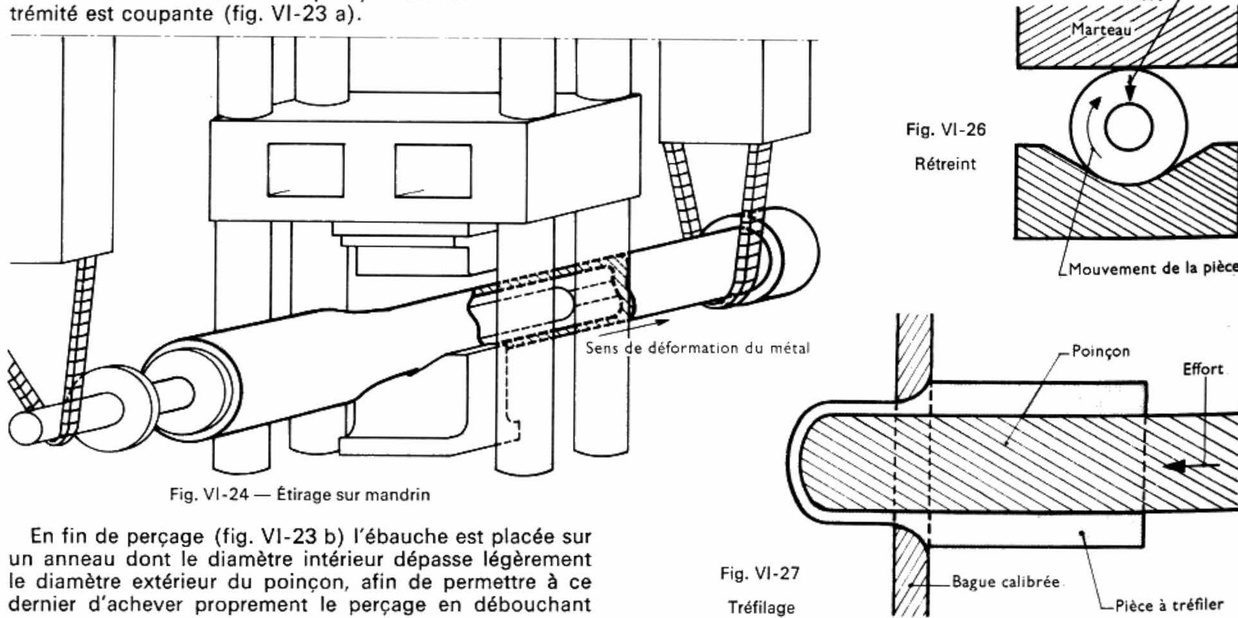


Fig. VI-24 — Étirage sur mandrin

Fig. VI-26

Rétreint

Fig. VI-27

Tréfilage

En fin de perçage (fig. VI-23 b) l'ébauche est placée sur un anneau dont le diamètre intérieur dépasse légèrement le diamètre extérieur du poinçon, afin de permettre à ce dernier d'achever proprement le perçage en débouchant à l'intérieur de l'anneau. La zone axiale du lingot, qui est la moins compacte, se trouve éliminée par le perçage.

— *Étirage sur mandrin.* — Cette opération est réalisée en vue d'augmenter la longueur d'un corps creux (fig. VI-24). La largeur du marteau et de l'enclume mesurée dans la direction de l'allongement est faible en vue de permettre l'écoulement du métal dans le sens de l'axe du mandrin. À la fin de l'opération le diamètre intérieur du corps creux est sensiblement égal au diamètre extérieur du mandrin.

— *Bigornage.* — Contrairement à l'étirage sur mandrin, le bigornage qui est fait lui aussi à partir d'une ébauche percée de part en part, vise à obtenir une augmentation du diamètre de la pièce. À cet effet, la largeur du marteau est égale à la hauteur de l'ébauche en vue de retenir le métal dans le sens de l'axe et de favoriser son écoulement dans la direction perpendiculaire (fig. VI-25).

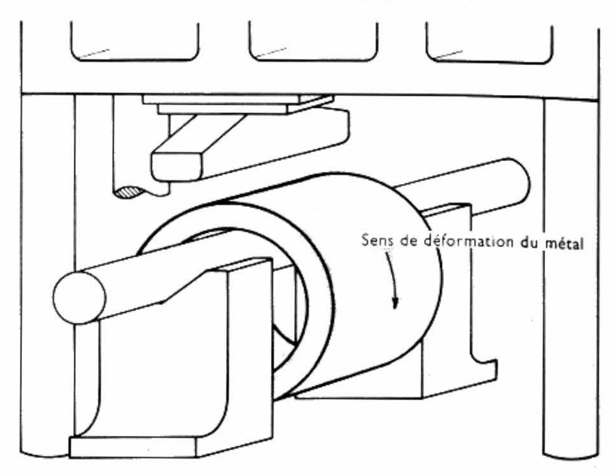


Fig. VI-25 — Bigornage

— *Rétreint.* — Cette opération (fig. VI-26) consiste à réduire les diamètres intérieur et extérieur d'une ébauche creuse par un resserrage. Le rétreint est généralement utilisé pour la réduction, sur une partie de sa longueur, du diamètre d'un corps creux préalablement forgé sur mandrin.

— *Tréfilage.* — Le tréfilage (fig. VI-27) vise à réduire le diamètre extérieur et l'épaisseur de la paroi d'une ébauche préalablement percée, en vue de la fabrication d'un corps creux fermé à une extrémité (bouteille). L'opération se fait à l'aide d'un poinçon horizontal et de bagues calibrées.



Fig. VI-28 — Manivelle de vilebrequin polybloc obtenue par pliage à 180° (*Creusot-Loire*)

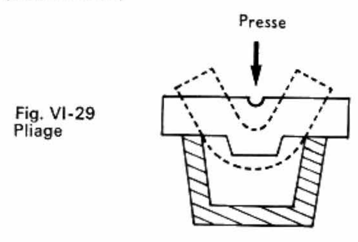


Fig. VI-29
Pliage

— *Pliage.* — La première partie d'une telle opération est représentée sur la figure VI-29 ; la fin du pliage est réalisée en position horizontale. Les opérations de pliage peuvent être conduites en vue d'obtenir des rabattements inférieurs à 180°

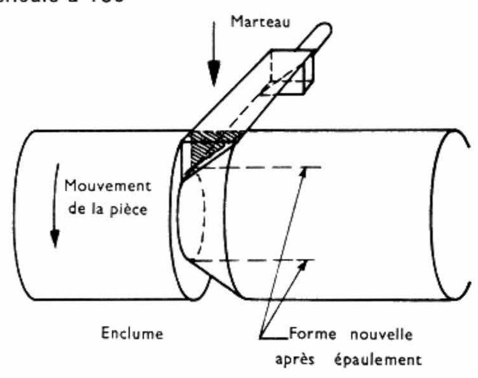


Fig. VI-30 — Trianglage avant épaulement d'une pièce circulaire

— *Tringlage.* — Le tringlage est une opération préparatoire qui consiste à marquer certains emplacements en vue d'une opération ultérieure. Il est effectué en intercalant, entre le marteau et la pièce, une tringle de faible section laissant une empreinte à la surface du métal.

— *Trianglage.* — Le trianglage est une opération préliminaire destinée à l'obtention d'un changement local de section ou de forme (fig. VI-30). Il est précédé d'un tringlage et s'effectue en enfonçant un triangle plein entre le marteau et la pièce. Il peut intéresser toute la périphérie dans le cas d'une section circulaire ou une seule face si la section est rectangulaire.

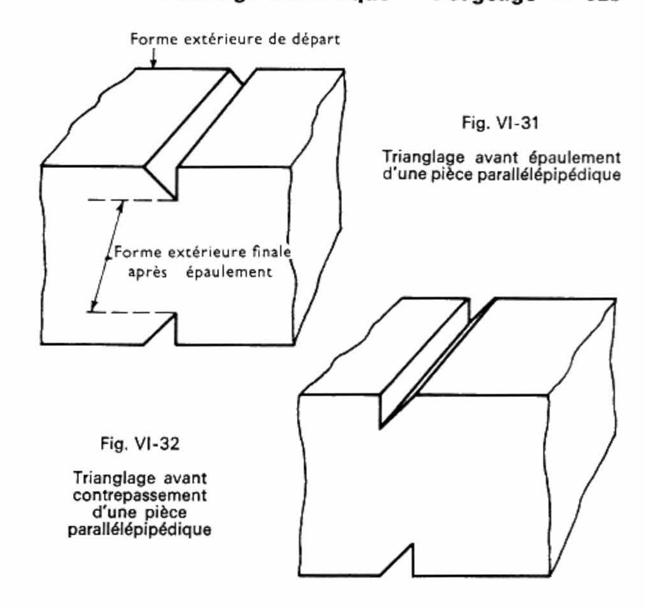


Fig. VI-31

Trianglage avant épaulement d'une pièce parallélépipédique

Fig. VI-32

Trianglage avant contrepassement d'une pièce parallélépipédique

— *Épaulement.* — Cette opération (fig. VI-31) consiste à réaliser un décrochement entre deux zones de sections différentes. Après un trianglage, il est procédé à l'étirage de la zone de petite section.

— *Contrepassement.* — Le contrepassement, toujours précédé d'un trianglage (fig. VI-32), consiste à désaxer une partie de la pièce comme indiqué sur la figure VI-33. Il est en particulier utilisé pour désaxer les zones correspondant aux futures manivelles d'un vilebrequin.

— *Torsion ou maillage.* — Il s'agit d'une opération (fig. VI-34) qui consiste à provoquer le décalage angulaire des manivelles d'un vilebrequin. La torsion est précédée d'un contrepassement, suivi d'un usinage amenant la surface du tourillon à une forme cylindrique. Elle est réalisée à la température de forgeage après un chauffage limité à la zone soumise à la torsion.

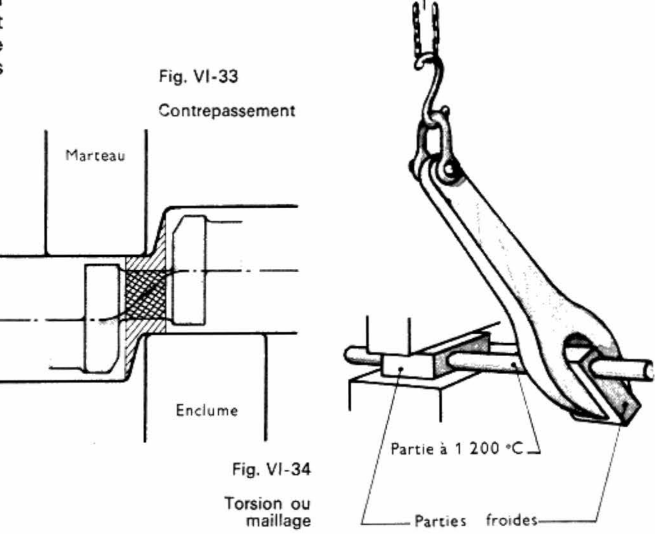


Fig. VI-33

Contrepassement

Fig. VI-34

Torsion ou maillage

— *Cintrage.* — Cette opération (fig. VI-35) est réalisée entre un marteau et une enclume de formes appropriées.

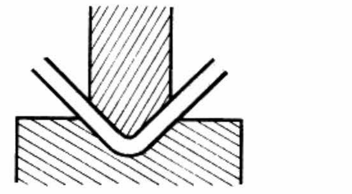


Fig. VI-35

Cintrage

1.4.3. Exemples de fabrications de pièces importantes de forme géométrique simple

1° *Pièce cylindrique forgée pleine :* Rotor de turbine basse pression d'un groupe de 600 MW fabriqué sur une presse de $7\,500 . 10^3$ daN à partir d'un lingot de 190 t. (Acier : 0,25 C, 3,5 Ni, 1,7 Cr, 0,4 Mo, 0,1 V).

Le lingot de départ, de diamètre moyen 2 540 mm, est représenté sur la figure VI-1. Il s'agit d'un lingot dit « renversé » dont la section augmente au fur et à mesure que l'on s'élève (conicité 7 à 10 %). La solidification progresse de ce fait à partir du pied, ce qui a pour effet de réduire la longueur de la retassure principale en la rejetant vers le haut.

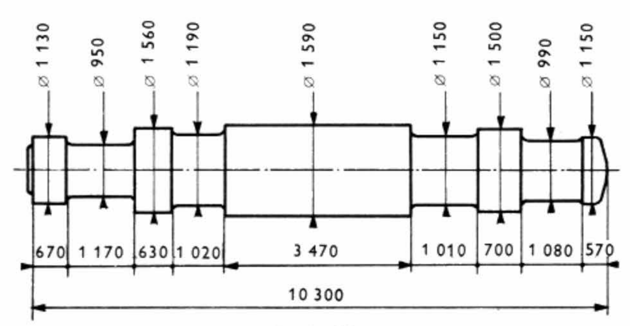


Fig. VI-36

La pièce de forge terminée (fig. VI-36) comporte une table et différents plateaux séparés les uns des autres par des parties cylindriques de section plus faible. Les surépaisseurs sont voisines de 50 mm. Le diamètre maximal qui est celui de la table atteint 1 590 mm. La fabrication comporte douze opérations appelées *chaudes*, séparées par une remise au four destinée à réchauffer la pièce à la température de forgeage, proche de 1 200 °C.

Les sept premières chaudes constituent les opérations d'ébauchage : le lingot est transformé en une ébauche cylindrique de diamètre 1 670 mm et de longueur 6 700 mm. Les cinq dernières chaudes constituent les opérations de finition.

1re à 3e chaude : étirage du corps du lingot au diamètre de 2 270 mm et sectionnage des chutes tête et pied ;

4e chaude : refoulement au diamètre de 2 490 mm (V. hors-texte) ;

5e chaude : réétirage au diamètre de 2 270 mm ;

6e chaude : refoulement au diamètre de 2 490 mm ;

7e chaude : réétirage au diamètre de 1 670 mm (fig. VI-37) ;

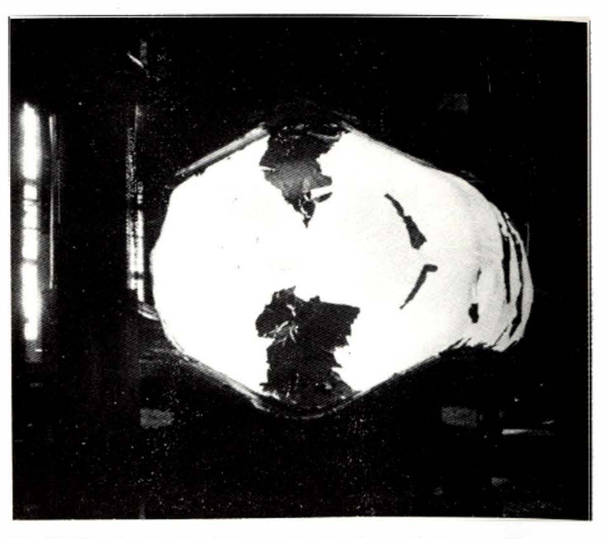


Fig. VI-37 — 7e chaude : étirage après deuxième refoulement ; la pièce est ensuite tournée de 90° puis forgée dans le sens perpendiculaire (*Creusot-Loire*)

8e chaude : marquage par tringlage des positions à triangler ;

9e chaude : trianglage des positions correspondant au changement de section ;

10e à 12e chaude : étirage de la pièce aux cotes de forge (fig. VI-38).

Rendement du lingot

Répartition du métal du lingot	Masse en tonnes	Pourcentage de la masse du lingot
Pièce brute de forge (partie utile)	114 t	60
Chute tête (masselotte)	35 t	18,5
Chute pied	27 t	14
Perte au feu (1)	14 t	7,5
Masse du lingot	190 t	100

(1) Les pertes au feu sont représentées par de la calamine résultant de l'oxydation du métal de la surface aux températures élevées du forgeage. La perte au feu est d'autant plus importante que le nombre de chaudes est plus grand et la surface extérieure de la pièce plus étendue.

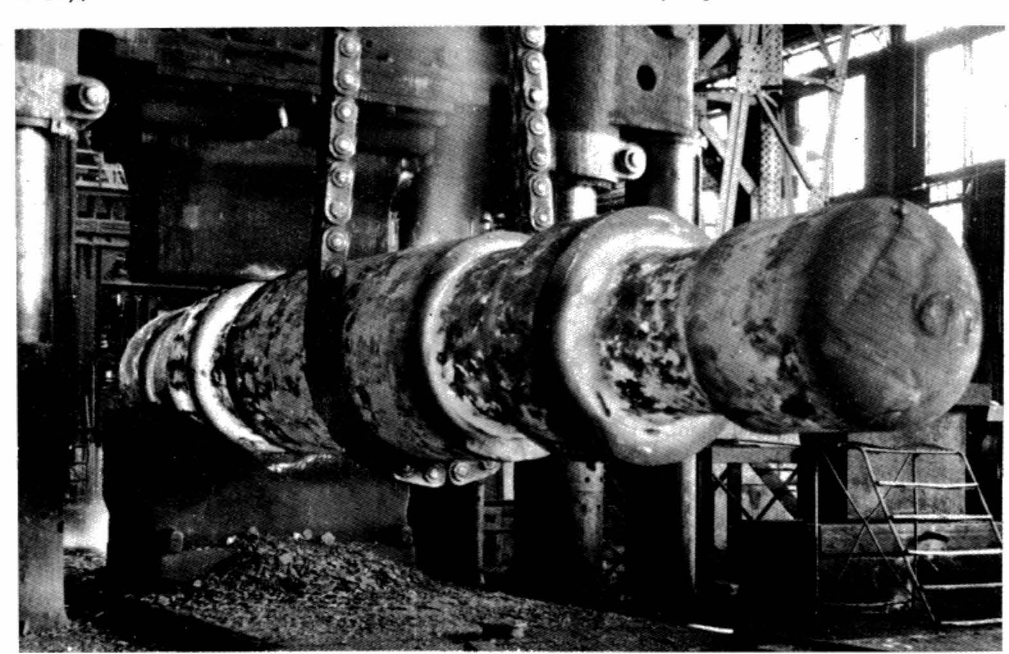


Fig. VI-38

Finition d'un rotor de turbine basse pression (*Creusot-Loire*)

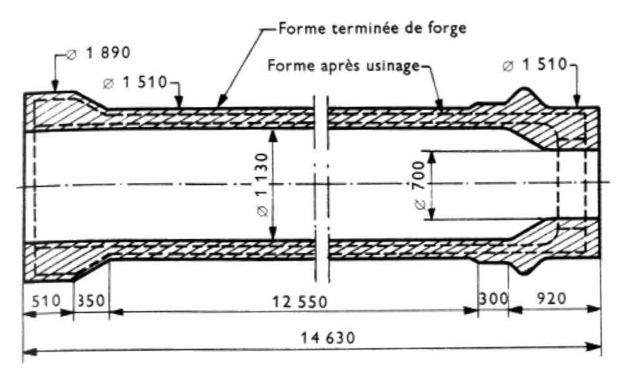


Fig. VI-39 — Corps de tube de synthèse

2° *Pièce cylindrique forgée creuse :* Corps d'un tube de synthèse pour l'industrie chimique (acier : 0,35 C, 3,2 Cr, 0,55 Ni, 0,6 Mo) (fig. VI-39). Le lingot de départ, de diamètre moyen 2 400 mm, pèse 160 t.

Il s'agit d'un lingot dit « droit » dont la section diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pied. La retassure affecte la région axiale sur presque toute sa hauteur ; elle est localisée dans une zone de faible diamètre et disparaît lors de l'élimination de la région axiale par perçage ou forage.

La masselotte d'un lingot droit est plus faible que celle d'un lingot renversé. Il en résulte une économie de métal voisine de 5 %. En raison de l'élimination de la zone axiale, par perçage, l'ébauchage se limite à une réduction de section du lingot amené au diamètre de 2 270 mm.

1re chaude : mise au diamètre de 2 270 mm et sectionnage des chutes tête et pied. La longueur de l'ébauche de 2 600 mm autorise l'exécution du perçage à chaud et du bigornage sans écrasement préalable ;

2e chaude : perçage à chaud au diamètre de 670 mm ;

3e à 6e chaude : bigornage amenant le diamètre intérieur de l'ébauche de 670 mm à 1 130 mm (fig. VI-40) ;

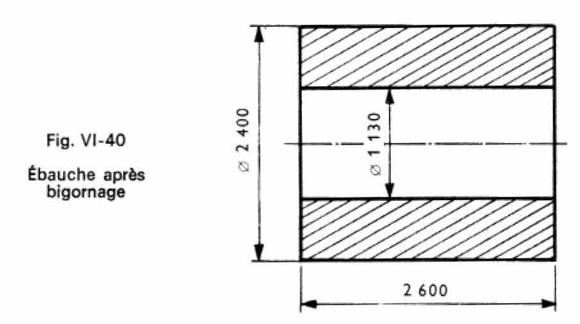


Fig. VI-40

Ébauche après bigornage

7e à 13e chaude : étirage sur mandrin au diamètre de 1 130 mm (fig. VI-41) ;

14e chaude : rétreint d'une extrémité en vue d'amener son diamètre à 700 mm.

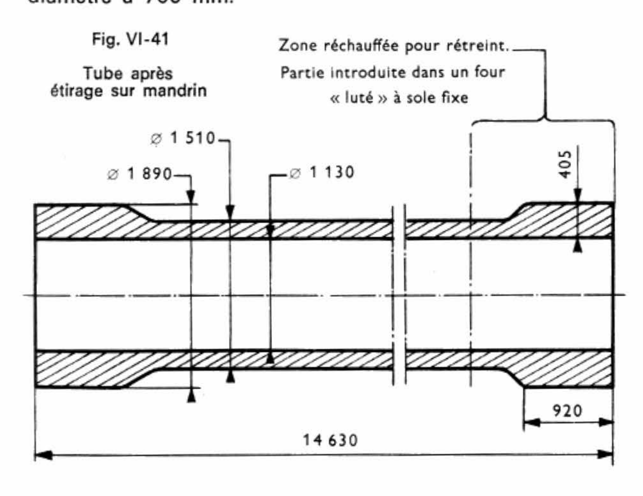


Fig. VI-41

Tube après étirage sur mandrin

Rendement du lingot

Répartition du métal du lingot	Masse en tonnes	Pourcentage de la masse du lingot
Pièce brute de forge (partie utile)	107 t	66
Chute tête (masselotte)	18 t	12
Chute pied	6 t	4
Métal enlevé par perçage	12 t	7,5
Perte au feu	17 t	10,5
Masse du lingot	160 t	100

En raison de l'élimination des défauts axiaux lors du perçage, les chutes tête et pied sont limitées à 12 et 4 % contre 18,5 et 14 % dans le cas précédent. En revanche, la perte au feu s'élève à 10,5 % en raison du nombre élevé de chaudes et de la plus grande surface exposée à l'oxydation une fois le perçage réalisé.

2. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS

À l'heure actuelle, la presse est l'engin exclusivement utilisé pour la transformation des lingots dont la masse dépasse quelques tonnes. En effet, la déformation par pression a un rendement plus élevé que la déformation par percussion. Les marteaux-pilons ne reprennent l'avantage que sur les petites unités dont la cadence est supérieure à celle de la presse.

Ainsi, dès le début du siècle, les presses ont remplacé les très gros marteaux-pilons dont la lourde masse tombante atteignait 125 t. À l'heure actuelle la masse tombante des marteaux-pilons est rarement supérieure à 10 t ; les progrès des presses rapides tendent à abaisser ce maximum à 5 t.

2.1. Engins de forgeage

2.1.1. Presses hydrauliques

1° *Presses hydrauliques classiques.* — Le schéma d'une presse hydraulique de type classique est représenté sur la figure VI-42. Cette presse à commande supérieure

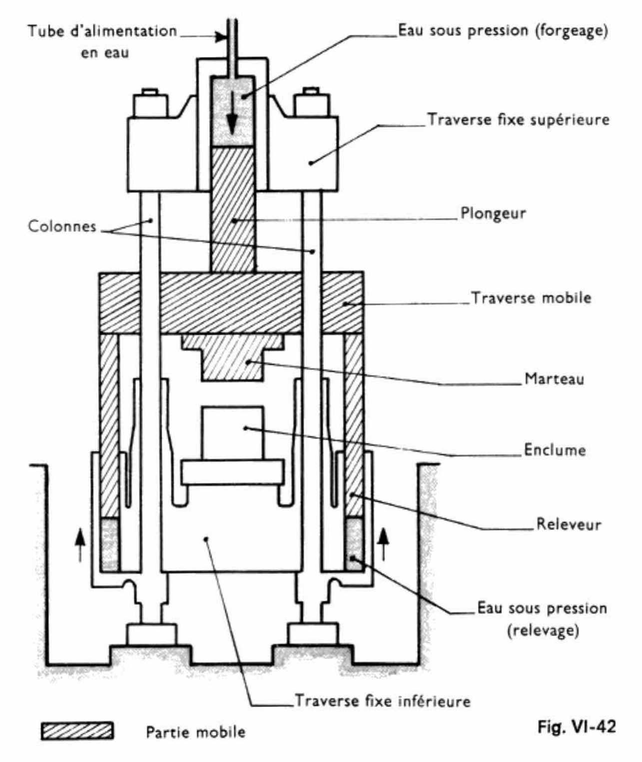


Fig. VI-42

possède un seul cylindre. Le fluide en contact avec le plongeur est de l'eau à laquelle on ajoute, à un taux de 2 à 3 %, de l'huile émulsionnée pour lubrification et protection contre la corrosion.

La force des presses de forge les plus puissantes ne dépasse pas 150 méganewtons environ ce qui correspond à 15 000 tonnes-force c'est-à-dire au poids d'une masse de 15 000 t (cela explique que les constructeurs utilisent encore souvent cette dernière caractéristique plutôt que l'indication de la force maximale en newtons). Elle reste ainsi sensiblement inférieure à celle des presses à matricer les alliages légers qui peuvent atteindre 500 MN. Dans les presses à matricer le contact prolongé des outils avec la pièce est rendu possible par la faible température de forgeage des alliages légers ; la matrice en acier ne subit de ce fait aucun ramollissement préjudiciable à sa tenue. Ces presses sont animées d'un mouvement lent et continu alors que les presses à forger, dont la course du marteau est beaucoup plus grande, fonctionnent à une vitesse plus élevée, pouvant atteindre 200 mm/s et possèdent une forte cadence de frappe. Leur hauteur utile (*ouverture*) est très supérieure à celle des presses à matricer en vue de permettre le refoulement des ébauches.

Lorsque la force de la presse dépasse 15 à 20 MN le cylindre unique est remplacé par deux ou trois cylindres.

Les plongeurs qui communiquent au marteau, par l'intermédiaire de la traverse (sommier) mobile, l'effort exercé par le fluide, se déplacent à l'intérieur des cylindres.

La figure VI-43 représente une presse de 45 MN à trois plongeurs de 15 MN chacun. Suivant la force exigée par l'opération, on fait agir les trois plongeurs simultanément (45 MN) ou les deux plongeurs latéraux (30 MN) ou encore le seul plongeur central (15 MN). La marche à un ou deux plongeurs vise à réduire la consommation d'eau sous pression lorsque la force exigée est faible.

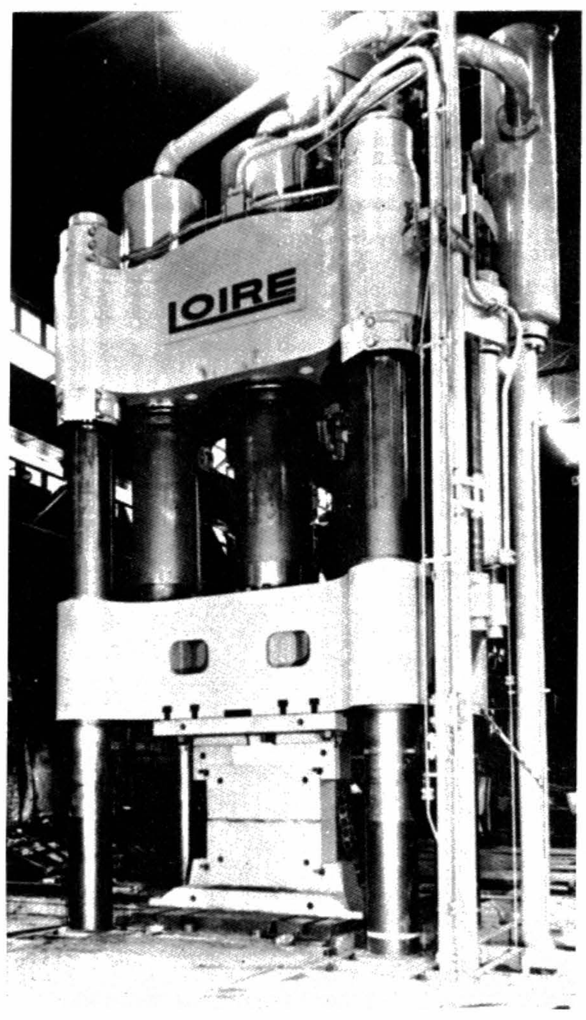


Fig. VI-43 — Presse à forger « Loire » de 45 MN à 3 plongeurs (*Ateliers et Chantiers de Bretagne-Cockerill*)

Les plongeurs sont munis de joints d'étanchéité dont il convient d'éviter la détérioration sous l'effet des efforts horizontaux. À cet effet les plongeurs peuvent être reliés à la traverse mobile par des joints à rotule qui transmettent les seuls efforts verticaux (fig. VI-44).

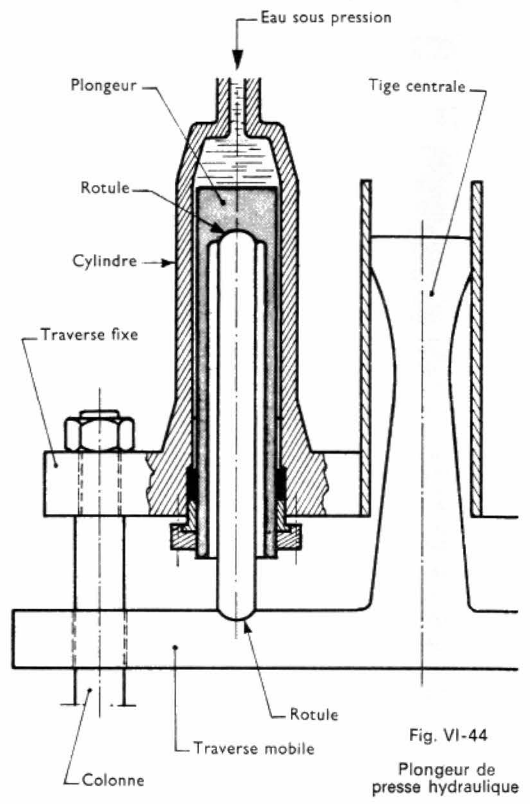


Fig. VI-44
Plongeur de presse hydraulique

La traverse mobile prend appui sur quatre colonnes. Ces dernières sont généralement assemblées aux traverses fixes (supérieure et inférieure) par un emmanchement conique et des écrous exerçant un effort de traction qui doit dépasser l'effort maximal de la presse. Une tige centrale, solidaire de la traverse mobile et dont l'extrémité glisse dans un guide cylindrique fixé à la traverse supérieure peut être ajoutée en vue d'absorber les efforts de flexion que la traverse mobile exerce sur les colonnes. Son efficacité est d'autant plus grande que sa longueur est importante.

2° *Commande de la presse.* — Une presse hydraulique permet de multiplier un effort par l'intermédiaire d'un fluide en contact avec deux pistons de sections différentes. Le piston de grande section S est le plongeur agissant sur la traverse mobile. Le piston de faible section s est l'organe de commande situé en dehors de la presse. L'effort f exercé sur ce dernier se traduit par une augmentation de la pression du fluide $p = \frac{f}{s}$ qui s'exerce sur la surface S du plongeur en développant un effort égal à :

$$F = pS = \frac{fS}{s}$$

L'effort exercé sur le plongeur se trouve donc multiplié par $\frac{S}{s}$. Le déplacement des deux pistons est dans le rapport inverse de celui des sections.

— *Commande vapohydraulique.* — La vapeur, utilisée autrefois, agissait par l'intermédiaire d'un piston différentiel.

— *Commande par pompes et accumulateurs.* — Les pompes sont généralement des pompes alternatives comportant des pistons actionnés par un arbre-manivelle. Les pompes centrifuges dont le rendement est inférieur à celui des pompes à pistons sont peu employées.

Les pompes peuvent agir :

- soit directement en refoulant le fluide en direction du cylindre de la presse,
- soit indirectement par l'intermédiaire d'un accumulateur.

L'action par refoulement direct présente l'inconvénient de demander aux pompes une grande puissance instantanée ; celles-ci doivent donc avoir des dimensions importantes et les frais d'installation sont élevés.

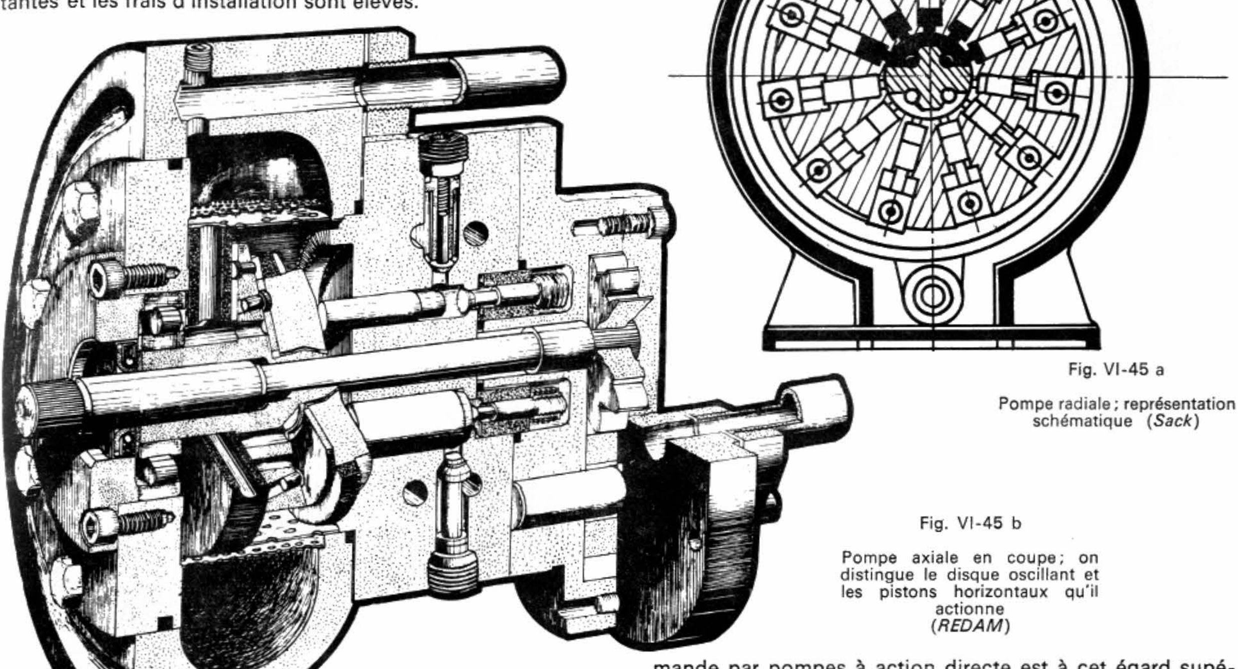


Fig. VI-45 a

Pompe radiale ; représentation schématique (*Sack*)

Fig. VI-45 b

Pompe axiale en coupe ; on distingue le disque oscillant et les pistons horizontaux qu'il actionne (*REDAM*)

On peut utiliser des pompes moins puissantes en les faisant agir en combinaison avec un accumulateur. La puissance de la pompe qui continue à travailler pendant les temps morts correspond à la puissance moyenne (temps morts compris) et non à la puissance maximale de la presse. Un accumulateur est constitué. :

- soit par un poids agissant à la surface *s* de l'eau. Le poids soulevé par l'eau en provenance des pompes descend à chaque appel des plongeurs ;
- soit par une réserve d'air sous pression (150 à 400 atmosphères) en contact avec l'eau agissant sur les plongeurs. La surface de séparation de l'air et de l'eau correspond à *s*. Le volume d'air est égal à dix fois celui de l'eau en vue de limiter les variations de pression lors de la descente des plongeurs.

L'approche des plongeurs jusqu'à l'entrée en contact du marteau avec la pièce se fait sous une faible pression (6 à 7 atmosphères) en vue d'économiser l'eau à pression élevée.

La remontée de la traverse mobile est réalisée à l'aide de deux releveurs de faible section.

3° *Presses rapides oléohydrauliques.* — La commande par pompes et accumulateurs est adaptée à la fabrication de pièces importantes dont les tolérances dimensionnelles sont intentionnellement portées à une valeur élevée en vue d'éviter le risque de rebut dû à un défaut de surface.

Les pièces de petites dimensions, fabriquées en série, s'accommodent de tolérances plus serrées que l'on cherche alors à réduire au strict minimum (1 à 2 mm). Le problème est le même pour les ronds en aciers spéciaux destinés à être débités en tranches de petit volume.

La précision du fonctionnement obtenue par l'exactitude de la position basse du marteau en fin de course devient alors une caractéristique essentielle de la presse. La commande par pompes à action directe est à cet égard supérieure à celle comportant un accumulateur. En effet, le temps de réponse des appareils de commande *fait dépendre la précision de l'engin du débit instantané du fluide en mouvement*. L'accumulateur fournissant un effort déterminé, le débit du fluide est, à chaque moment, fonction de la résistance offerte par le métal à l'effort de la presse. Les pompes à action directe permettent au contraire de travailler à débit constant quelle que soit la résistance opposée par le métal à l'action du marteau. D'un autre côté, la réduction des temps morts qui caractérise les presses à cadence rapide vient réduire l'intérêt de l'accumulateur.

Malheureusement, les pompes à eau ont des performances limitées par la faible vitesse des pistons obligatoirement munis de joints d'étanchéité.

Les pompes à huile, qui échappent à cette sujétion en raison de la viscosité du fluide et de son pouvoir lubrifiant, ont des vitesses de fonctionnement beaucoup plus grandes leur permettant de fournir un débit important sous un encombrement réduit

Les pompes à huile sont du type en ligne, radial ou axial. Leurs pistons sont commandés par un dispositif excentré dans les pompes en ligne et dans les pompes radiales (fig. VI-45 a) ou par un disque oscillant tournant à grande vitesse (1 500 tr/mn) directement actionné par un moteur électrique dans les pompes axiales (fig. VI-45 b).

La substitution de l'huile à l'eau a entraîné une modification du système de commande. Un grand nombre de presses oléohydrauliques sont à commande inférieure (ou en sous-sol) (V. fig. VI-46). Ce système évite les risques d'incendie par projection d'huile sur la pièce à la température de forgeage et soustrait l'huile contenue dans les cylindres à l'échauffement résultant du rayonnement de la pièce. Il entraîne aussi une réduction de la longueur des canalisations et, par là-même, une diminution des variations de volume de l'huile sous l'effet de la compression.

Il permet également de diminuer l'encombrement en hauteur de l'engin et d'abaisser son centre de gravité, ce qui améliore sa stabilité et conduit à une meilleure répartition des efforts de traction exercés sur les colonnes. En

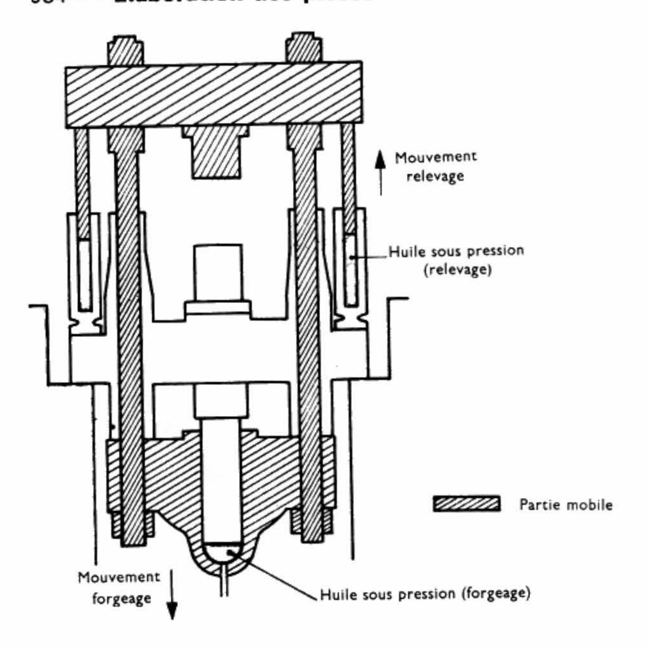


Fig. VI-46 — Presse oléohydraulique à commande en sous-sol

revanche, les fondations sont plus importantes et le poids de la masse en mouvement est cinq à six fois plus grand que dans les presses classiques à commande supérieure.

— *Presses à tige de guidage.* — Une des préoccupations des constructeurs de presses est d'éviter les efforts excentrés soumettant les colonnes à des contraintes horizontales (flexion).

À cet effet une tige de guidage peut être ménagée sur les presses à quatre colonnes (fig. VI-47). Le sommier mobile se déplace en glissant autour de la tige centrale avec un jeu d'autant plus réduit que cette partie de la presse, protégée contre le rayonnement des pièces de forge, est exempte de dilatations thermiques. Les efforts horizontaux exercés sur le sommier sont transmis à la tige centrale de forte section et n'affectent pas les colonnes dont le diamètre peut être diminué (ce qui réduit le poids de la masse en mouvement). Des presses de ce type de 30 et même 40 MN ont été réalisées suivant cette conception.

— *Presses à deux colonnes.* — Les colonnes, appelées également **tirants,** qui font partie de la masse en mouvement, n'ont plus à assurer la rigidité de l'ensemble comme dans les presses à commande supérieure. Le nombre des colonnes peut être réduit à deux lorsque les efforts imposés ne sont pas trop excentrés; cette disposition présente l'avantage de faciliter les manutentions. On trouve des presses à deux colonnes dont la force atteint 30 MN.

Le souci de réduire les temps morts en facilitant les changements d'outillage a conduit à disposer les colonnes obliquement en vue de permettre le dégagement latéral des marteau et enclume.

La figure VI-48 représente une presse à deux colonnes forgées, rondes, fixées au sommier mobile.

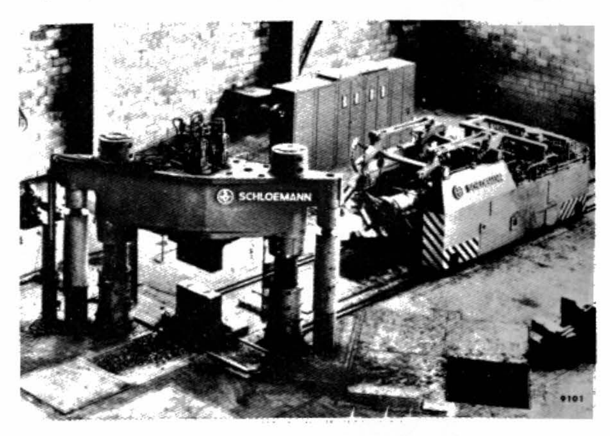


Fig. VI-48 — Presse oléohydraulique de 10 MN (dite de 1 000 t) à 2 colonnes forgées et commande en sous-sol (*Schlœmann*)

La figure VI-49 représente une presse dont le châssis est constitué d'un seul élément en acier moulé. La forme rectangulaire des colonnes facilite le guidage de la traverse mobile ainsi que les rattrapages de jeu entre colonnes et traverse par interposition de plaques. La rigidité de l'ensemble est améliorée grâce au raccordement progressif des parties verticale et horizontale qui se traduit par une augmentation de la résistance aux efforts de flexion.

4° *Presses à col de cygne.* — Il s'agit de petites presses (fig. VI-50) à commande supérieure et à un cylindre dont la force est pratiquement toujours inférieure à 10 MN. La disposition de ces presses a pour but de faciliter la manutention des pièces forgées.

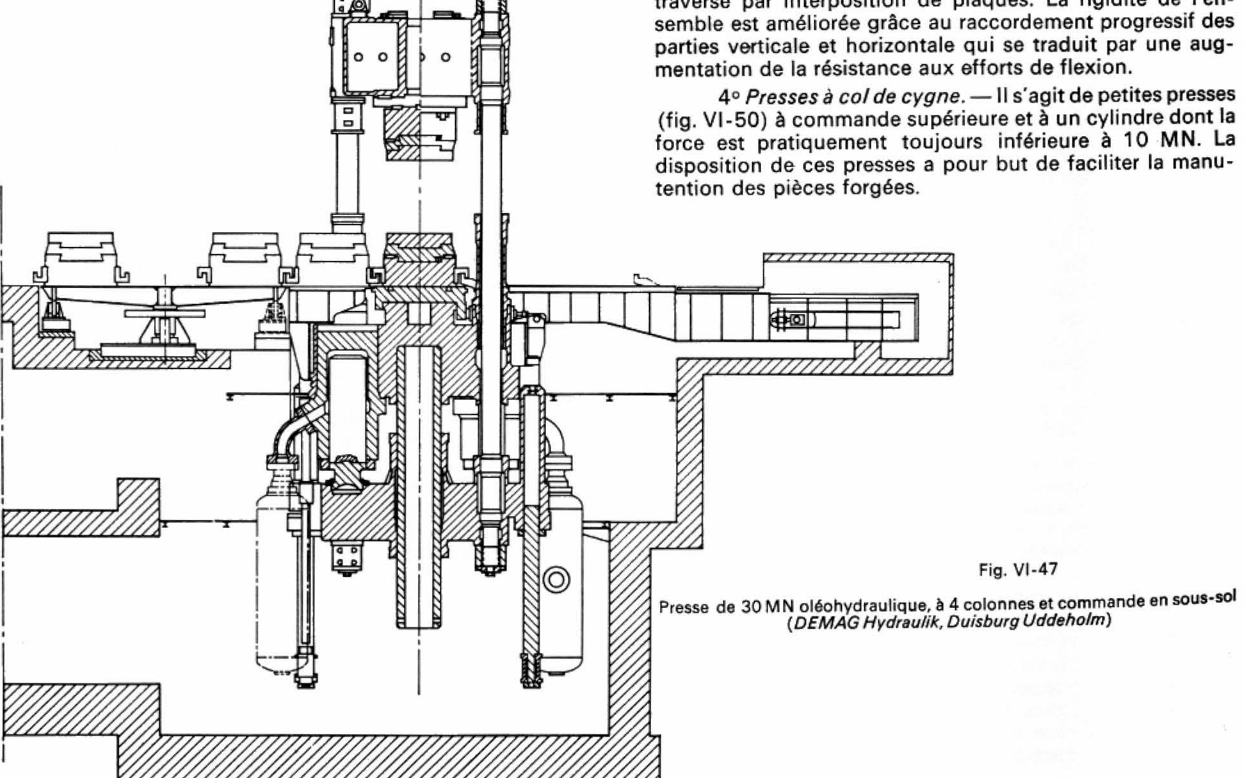


Fig. VI-47

Presse de 30 MN oléohydraulique, à 4 colonnes et commande en sous-sol (*DEMAG Hydraulik, Duisburg Uddeholm*)



Fig. VI-49 — Presse oléohydraulique de 18 MN à 2 colonnes (châssis monobloc moulé) et à commande en sous-sol (*SACK - Sandvikens - Jernverks AB*)

2.1.2. Marteaux-pilons. — Un marteau-pilon comporte une masse tombante — au-dessous de laquelle est fixé le marteau — solidaire d'un piston mû par la vapeur ou l'air comprimé. La masse tombante est guidée par des glissières, elles-mêmes montées sur deux jambages qui s'écartent au niveau de l'enclume afin de ménager une large ouverture permettant les manutentions (fig. VI-51).

Les pilons de moyenne et faible puissance sont à col de cygne.

L'enclume qui supporte la pièce pendant le forgeage repose sur une **chabotte** dont le poids atteint environ quinze fois celui de la masse tombante. La chabotte peut ainsi absorber la plus grande partie de l'énergie de choc.

Fig. VI-50

Presse à col de cygne de 5,5 MN ***(Hydraulik)***

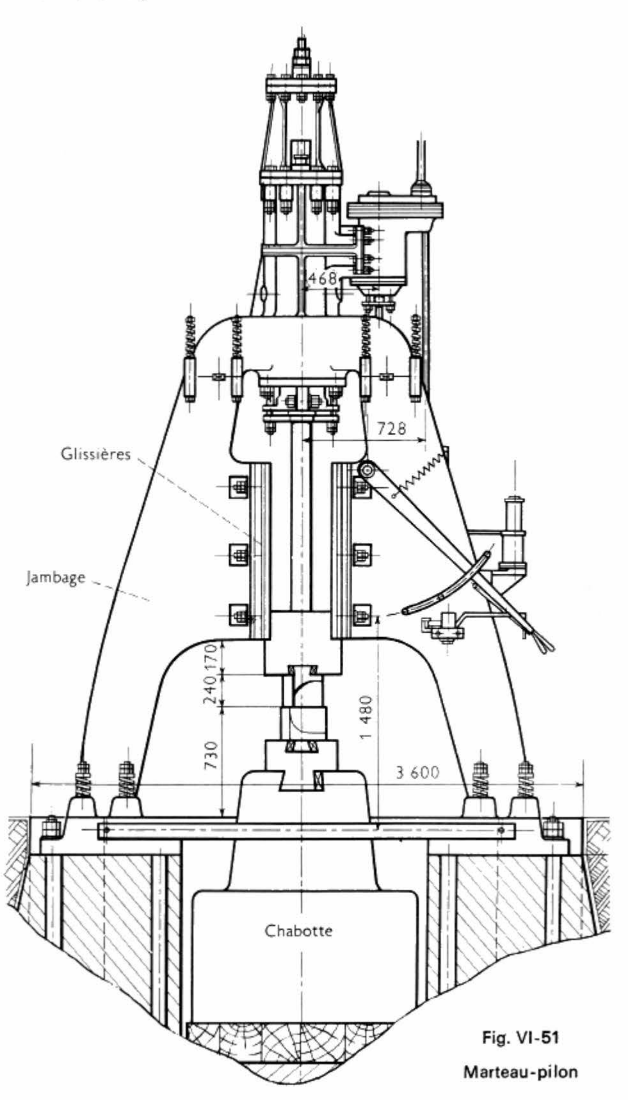


Fig. VI-51

Marteau-pilon

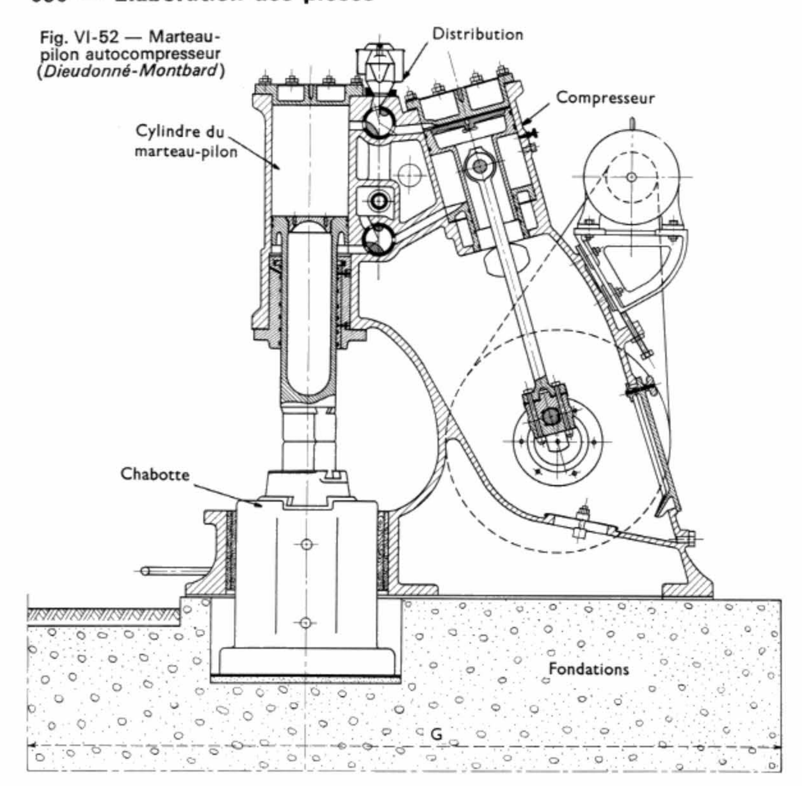


Fig. VI-52 — Marteau-pilon autocompresseur (*Dieudonné-Montbard*)

La vapeur alimentant un marteau-pilon provient d'une batterie de chaudières. L'air comprimé est produit soit par une station de compression sous une pression de 7 daN/cm² environ, soit par un compresseur autonome sous une pression de 4 daN/cm² environ.

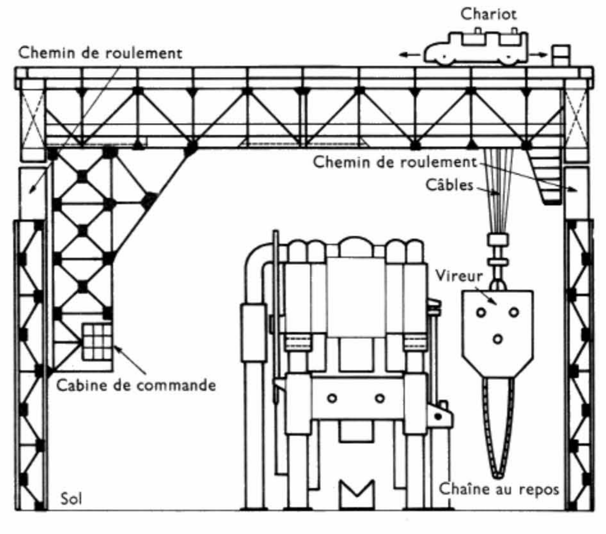


Fig. VI-53 — Pont roulant de forge (portée 25 m; hauteur de levage 15,50 m)

Un marteau-pilon est caractérisé par le poids de sa masse tombante. Cette dernière peut, soit tomber librement (marteau-pilon simple effet), soit être actionnée par le fluide sous pression à la descente comme à la montée (marteau-pilon double effet). Dans ce dernier cas, la vapeur ou l'air comprimé agissent alternativement sur les deux faces du piston.

L'intensité du coup dépend :

— de la masse tombante;

— de la vitesse de chute.

La vitesse de chute est plus grande dans les pilons à double effet dont le rendement est meilleur que celui des pilons à simple effet de même masse tombante.

Les pilons autonomes appelés *pilons autocompresseurs*, toujours actionnés à l'air comprimé, ont une cadence très rapide qui améliore leurs performances. Il s'agit d'engins dont la masse tombante peut atteindre 2 à 3 t. La cadence qui est de 80 coups par minute environ pour un pilon autocompresseur de 2 t s'élève à 300 coups par minute sur les petits engins de quelques dizaines de kilogrammes de masse tombante (fig. VI-52).

On estime qu'un pilon autocompresseur peut remplacer un engin à double effet dont la masse tombante est une fois et demie plus élevée.

2.2. Engins de manutention. — Une opération de forgeage nécessite au minimum des déplacements longitudinaux, associés à des mouvements de rotation de la pièce en cours d'exécution.

Ces opérations, ainsi que les transports de pièces à l'intérieur de l'atelier, sont réalisées au moyen de ponts-roulants et de manipulateurs.

2.2.1. Ponts-roulants de forge. — Un pont-roulant de forge est un engin très puissant dont l'organe essentiel est constitué par le **vireur;** il est relié au chariot mobile par des câbles mouflés qui assurent son déplacement en hauteur (fig. VI-53). Le vireur comporte un moteur électrique et un réducteur actionnant des chaînes qui supportent la pièce en cours d'opération. Les chaînes soutiennent la queue d'amarrage forgée aux extrémités de la pièce, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un bras d'amarrage muni d'un contrepoids (fig. VI-54). Lorsque la pièce a atteint une longueur suffisante, les queues d'amarrage devenues inutiles sont éliminées et les chaînes sont placées sous les extrémités de la pièce.

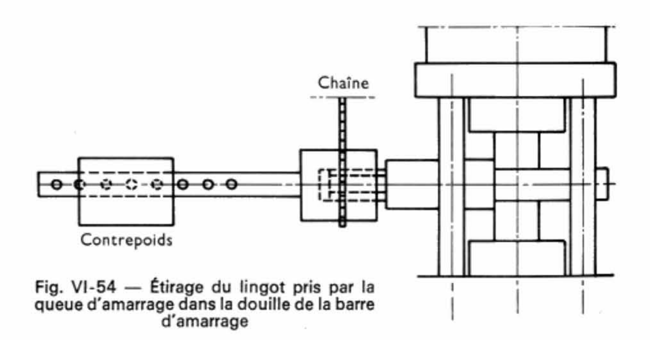


Fig. VI-54 — Étirage du lingot pris par la queue d'amarrage dans la douille de la barre d'amarrage

2.2.2. Manipulateurs. — Le manipulateur est un engin constitué d'un châssis à quatre roues supportant une pince articulée qui remplace le bras d'amarrage (V. hors-texte).

Il existe un grand nombre de modèles de manipulateurs dont la force portante s'échelonne de 5 kN à 800 kN environ. La longueur de la pièce allant le plus souvent en augmentant au cours de l'opération de forgeage, on doit tenir compte du couple agissant sur la tenaille dont la valeur augmente au fur et à mesure que le centre de gravité de la pièce s'éloigne de la pince (fig. VI-55). Les couples de charge s'échelonnent ainsi de 10 kN.m à 1 600 kN.m.

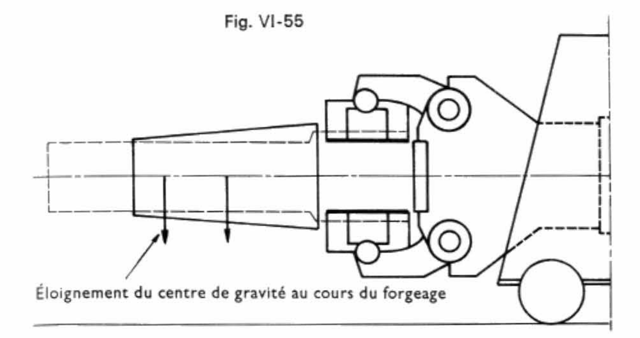
Le manipulateur permet :

1° Des mouvements principaux nécessaires aux opérations de forgeage :

— déplacements longitudinaux;

— rotation de la pince.

Fig. VI-55



2° Des mouvements auxiliaires exigés par les manutentions :

— ouverture et fermeture de la pince ;
— élévation et abaissement de la pince ;
— déplacement transversal de la pince ;
— changement d'orientation de la pince.

Si l'emploi d'un manipulateur permet toujours de suppléer à une insuffisance de main-d'œuvre, l'avantage qu'il procure sur le double plan de la productivité et de la rentabilité est d'autant plus élevé que le travail à réaliser est moins compliqué.

Un manipulateur peut être utilisé conjointement avec un pont-roulant pour le forgeage de pièces d'un poids supérieur à celui de sa charge nominale. Le manipulateur et le pont se font alors vis-à-vis des deux côtés de la presse.

Les petits manipulateurs, de charge inférieure à 10 t, sont souvent montés sur bandages. Ils disposent ainsi d'une autonomie qui leur permet de transporter les pièces du four de chauffage à la presse ou de la presse au four de traitement thermique.

La tendance actuelle consiste à placer les petits manipulateurs sur des rails et à leur adjoindre un engin auxiliaire sur bandages uniquement destiné au transport des lingots et des pièces.

2.3. Engins de chauffage

2.3.1. Généralités. — Le chauffage d'un lingot à partir de la température ordinaire est une opération rendue délicate par les contraintes que provoquent les différences de dilatation entre la zone extérieure plus rapidement chauffée et la zone située au cœur de la pièce dont la montée en température est plus lente.

Au début du chauffage, les zones extérieures tendent à se dilater du fait de l'élévation de leur température, mais elles sont retenues par la masse centrale dont le chauffage est plus lent. Il en résulte des efforts de traction à l'intérieur de la pièce, compensés par des efforts de compression en surface. Les efforts de traction sont générateurs de tapures. Ces différences s'atténuent considérablement lorsque le métal a acquis un degré de plasticité suffisant qui, pour la plupart des qualités, est atteint au-dessus d'une température voisine de 600 à 650 °C. Le chauffage doit donc être suffisamment lent pour obtenir une température homogène à l'intérieur du lingot jusqu'à ce que ce dernier soit parvenu à la température de 600-650 °C.

L'allure du chauffage doit être d'autant plus lente que le diamètre du lingot est plus grand et que l'acier est plus allié. En effet, les éléments d'addition réduisent la conductibilité thermique du métal, ce qui accentue les différences de température entre la zone extérieure et le cœur.

Pour cette raison, dans la mesure du possible, on cherche à éviter l'introduction d'un lingot froid dans un four chaud. Les lingots sont retirés de la lingotière à une température voisine de 600 °C, ce qui permet de conduire le chauffage assez rapidement.

Une fois atteinte la zone des températures où le métal est plastique, la vitesse de chauffage peut et doit même être grande en vue de limiter le temps de séjour aux températures supérieures à 900-1 000 °C et de réduire ainsi l'importance de la couche de calamine qui se forme à la surface de la pièce par oxydation du métal (elle entraîne une perte non négligeable). Cette perte est proche de 0,5 à 1 % par chaude. Elle peut atteindre et même dépasser globalement la valeur de 10 % dans les pièces creuses dont la surface extérieure totale est importante et qui nécessitent un nombre de chaudes élevé.

Indépendamment de la formation de calamine, l'oxygène diffuse à l'intérieur de l'acier et la teneur en carbone se trouve réduite. Des précautions contre ce phénomène de décarburation superficiel (atmosphère contrôlée, chauffage par induction) peuvent être nécessaires pour les petites pièces.

Le chauffage se termine par un maintien à la température — voisine de 1 200 °C pour l'acier — à laquelle le forgeage doit être effectué. Ce maintien a pour but d'uniformiser les températures régnant à la surface et à l'intérieur de la pièce. Dans les grosses pièces, les différences de températures en surface peuvent être proches de 20 °C ; celles entre la surface et le cœur ne doivent pas dépasser 30 à 40 °C environ à l'issue du maintien d'égalisation.

La pièce ne doit pas être portée localement à une température trop élevée, susceptible d'entraîner un effet de brûlure marqué par un début de fusion et une détérioration du métal résultant d'une pénétration d'oxygène le long des joints formant la limite des cristaux.

2.3.2. Principaux types de fours. — Les fours pits et les fours continus de grande longueur (fours poussants, fours à longerons, etc.) sont communément utilisés dans les laminoirs ; ils sont installés également dans les forges fabriquant des produits de série de dimensions relativement faibles. Les fours pits sont de simples fosses chauffées dans lesquelles les lingots sont disposés verticalement. Les fours continus sont divisés en zones successives maintenues chacune à une température déterminée que le produit à chauffer, placé en position horizontale et orienté perpendiculairement à l'axe du four, traverse successivement en même temps que sa température augmente.

Les fours les plus répandus dans les installations de forge sont des fours intermittents, généralement constitués d'une chambre unique entièrement tapissée de briques réfractaires (appelée *laboratoire*), à l'intérieur de laquelle se fait la totalité du chauffage. Il existe des fours à deux chambres contiguës destinées au chauffage de petites pièces en aciers spéciaux sensibles aux variations rapides de température. Les brûleurs de chacune des deux chambres sont alternativement en activité. Au sortir de la première chambre, les fumées traversent la seconde chambre où elles servent au chauffage des produits froids. Lorsque la chambre chauffée par les brûleurs est vide, les brûleurs de la seconde chambre se mettent en marche et la première chambre sert alors au chauffage des produits froids.

Le foyer des fours qui utilisaient le charbon en morceaux, — distinct du laboratoire — a été remplacé par des brûleurs répartis le long de la paroi ; ils sont alimentés soit par du charbon pulvérisé, soit de plus en plus par du fuel ou du gaz (gaz naturel, de gazogène, de fours à coke, etc.).

En vue de répartir la chaleur aussi uniformément que possible, les brûleurs sont en principe disposés sur une ou deux rangées situées au-dessus de la sole mobile.

Malgré son prix élevé, l'électricité peut être envisagée. Les éléments chauffants appelés *resistors* sont constitués d'une goulotte de carborundum remplie de coke de pétrole jouant la rôle de résistance.

La pièce repose sur des calages, en acier réfractaire, assez élevés pour permettre la circulation des gaz chauds au-dessous de la surface inférieure de la pièce.

— *Fours à sole fixe ou fours dormants.* — La pièce est introduite horizontalement par une ouverture ménagée dans la paroi frontale (V. fig. VI-56). Cette ouverture est fermée par une porte coulissant entre des glissières verticales et équilibrée par un contrepoids. Ces fours, adaptés au chauffage de pièces de dimensions faibles et moyennes, permettent également le chauffage partiel de pièces de grande longueur dont une partie se trouve alors à l'extérieur du four. Les pertes de chaleur sont évitées grâce à la construction d'un mur de briques provisoire fermant les ouvertures existant de part et d'autre de la pièce sur laquelle la porte vient reposer. Le four est alors dit *luté*.

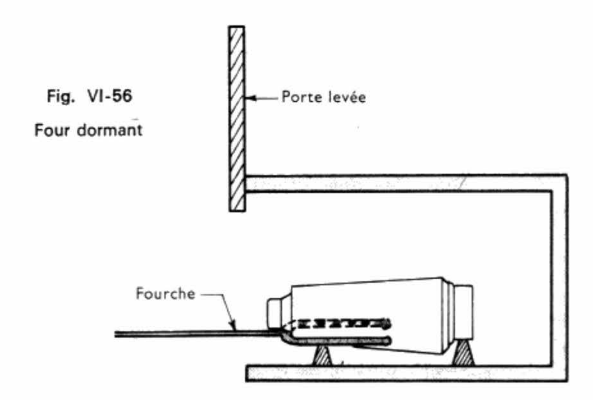


Fig. VI-56
Four dormant

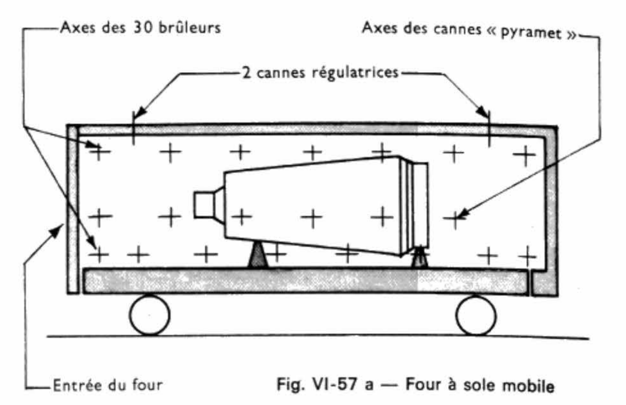


Fig. VI-57 a — Four à sole mobile

— *Fours à sole mobile.* — Ces fours (fig. VI-57 a et b) sont adaptés au chauffage des grosses pièces. Le chargement et le déchargement sont faits lorsque la sole est à l'extérieur du four. Le four représenté sur la figure est chauffé au gaz naturel. Il comporte deux rangées de brûleurs superposés en vue de répartir la chaleur le plus uniformément possible.

— *Fours à sole tournante.* — Le four à sole tournante (fig. VI-58) est un four continu circulaire dont l'entrée et la sortie sont situées à proximité l'une de l'autre. Ce type de four, très répandu dans les laminoirs à tubes où il sert au chauffage des demi-produits, est également adapté au chauffage des lingots et demi-produits de faibles dimensions destinés à être forgés. Il est utilisé en particulier pour les aciers spéciaux dont le chauffage doit être conduit très progressivement.

Le four est divisé en plusieurs zones de chauffage séparées par des murs orientés radialement qui laissent un espace libre au-dessus de la sole en vue de permettre la circulation des produits. Les zones de chauffage qui possèdent leurs propres brûleurs situés dans la paroi sont autonomes. Comme dans les fours continus longitudinaux, leurs températures sont réglées en vue d'assurer un chauffage progressif des produits.

Le chargement se fait par une porte latérale et le déchargement par une autre porte latérale, voisine de la première. Les produits font ainsi un tour complet à travers les différentes zones de chauffage.

La sole est soit un disque, soit plus généralement un anneau tournant, de largeur supérieure à la longueur du plus grand lingot utilisé en raison de la disposition radiale des pièces.

En général ces fours sont munis d'un unique engin de chargement et de déchargement.

2.3.3. Mesure des températures. — Les températures sont mesurées à l'aide de cannes pyrométriques réparties dans la voûte et dans les parois latérales (V. fig. VI-57a). Les températures peuvent être lues sur un cadran et enregistrées sur une bande de papier. Des dispositifs permettent d'assurer la régulation automatique du four à partir des températures enregistrées.

2.3.4. Chauffage local avant cintrage ou torsion de tourillons de vilebrequins. — Des fours de petites

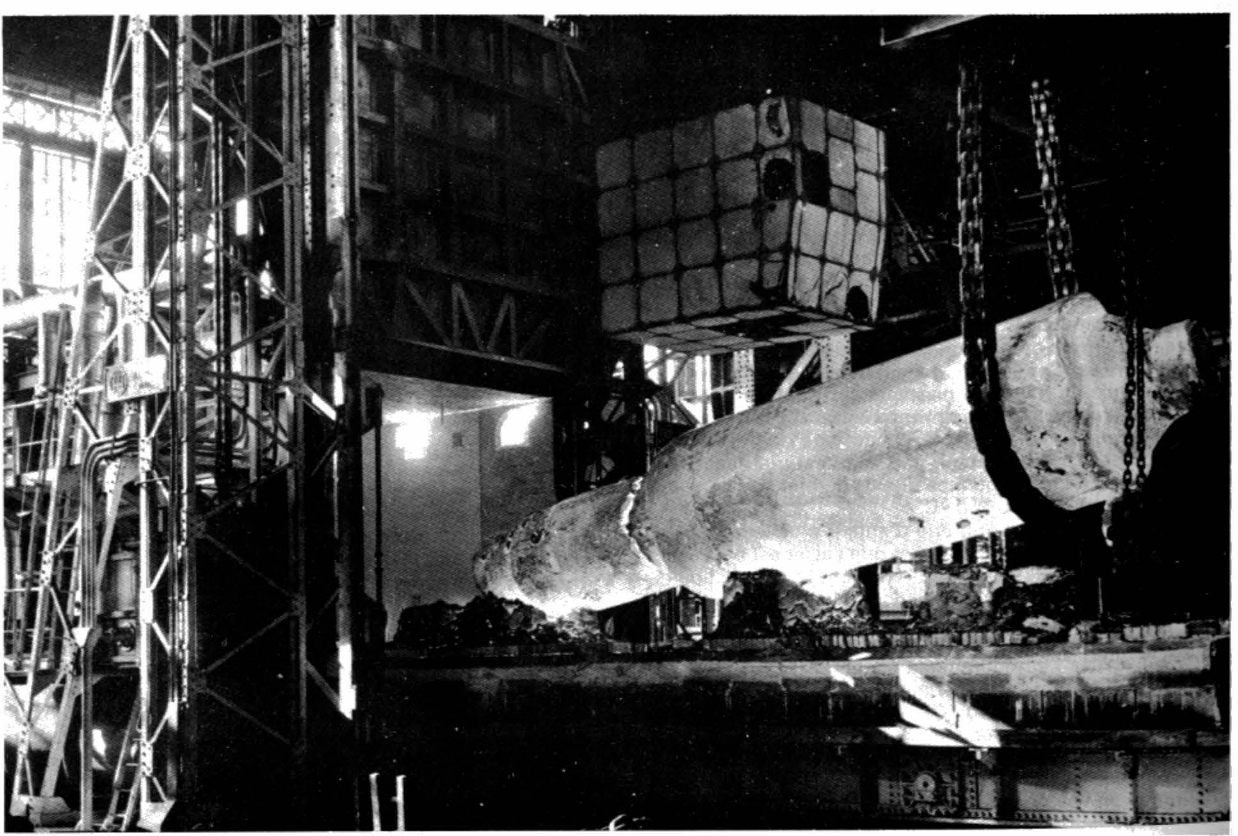


Fig. VI-57 b — Four de réchauffage Heurtey à sole mobile chauffé au gaz naturel; L: 12 m, l: 4 m; hauteur sole-voûte: 3,5 m; température maximale 1 300 °C; charge utile maximale 180 t. Sortie d'une ébauche de 149 t destinée à fournir un rotor d'alternateur (*Creusot-Loire*)

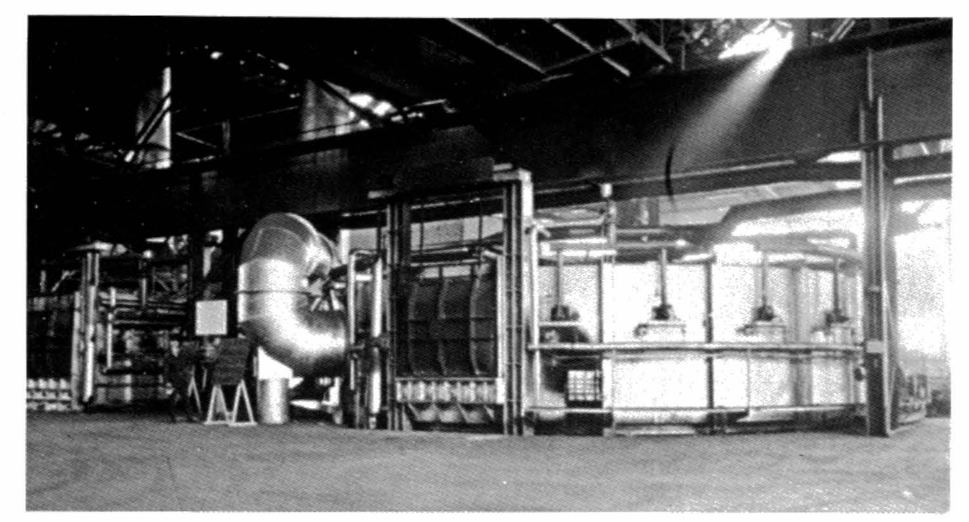


Fig. VI-58

Four à sole tournante (*Kraft*)

dimensions, mobiles, alimentés au gaz, permettent les chauffages locaux nécessaires à des opérations particulières telles que le cintrage d'une barre ou la torsion d'un arbre de vilebrequin.

2.4. L'automatisme à la forge

2.4.1. Presses et manipulateurs à commande intégrée. — Un progrès important dans la technique de la forge a résulté de l'introduction du fonctionnement automatique de la presse et du manipulateur. En raison de leur programme de fabrication varié et de leurs diverses sujétions, les très grosses presses ne se prêtent guère à un automatisme poussé. En revanche, les petites et moyennes installations ont largement bénéficié des progrès de l'automatisme. Leur rendement et leur précision en ont été sensiblement améliorés.

Ces progrès ont résulté de l'introduction de la commande oléo-hydraulique à action directe, de la mise au point d'électrovannes à fermeture rapide (réduction des temps de réponse aux ordres donnés) et de l'augmentation de la vitesse de fonctionnement des manipulateurs.

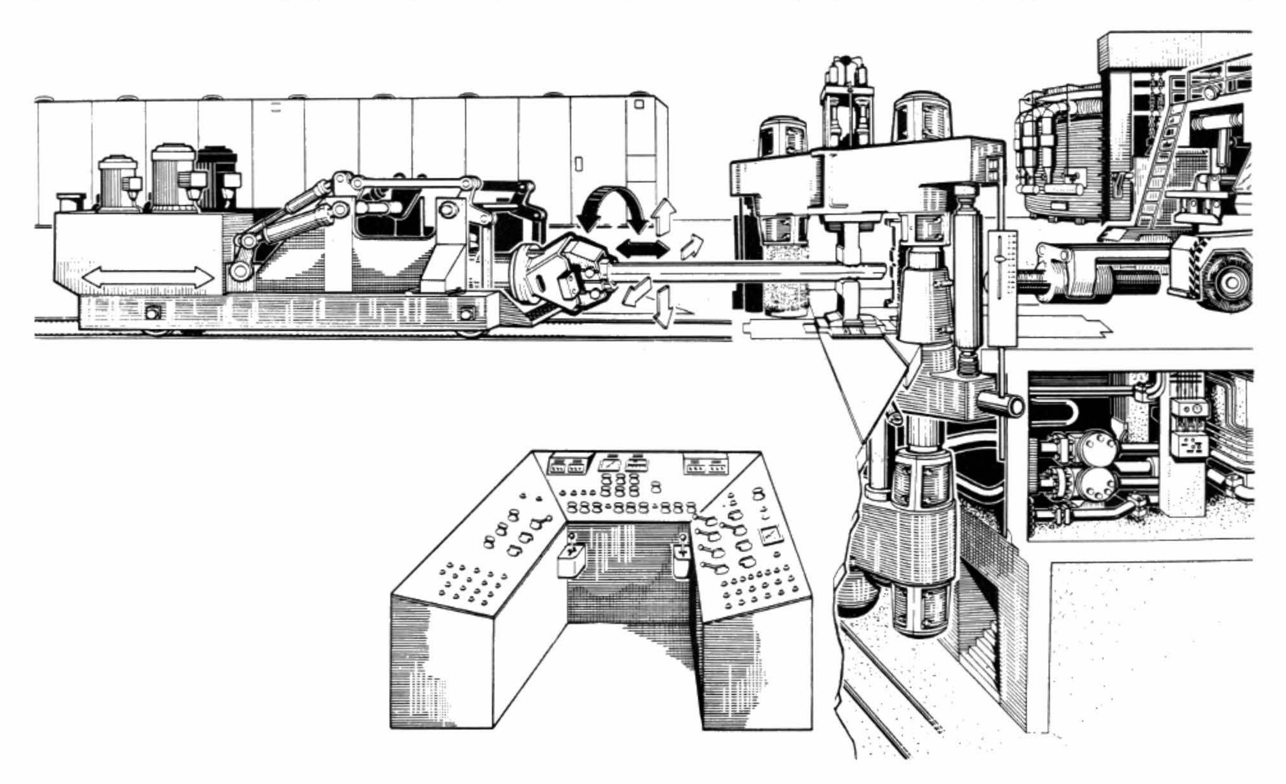
Le forgeage automatique est une opération où les mouvements de montée et de descente du marteau sont commandés automatiquement. Dans la commande intégrée, les mouvements du manipulateur sont synchronisés avec ceux de la presse.

Les consignes de forgeage sont portées sur une carte ou une bande perforée introduite dans un lecteur appartenant au pupitre qui contient les appareillages électroniques. L'opérateur doit seulement procéder au réglage des cotes spécifiées puis à l'enclenchement de l'opération qui se déroule ensuite automatiquement dans les conditions prévues par le programme.

La mesure de la distance séparant le marteau de l'enclume est faite automatiquement et le résultat est comparé à l'épaisseur à réaliser ; l'ordre d'inversion du mouvement du marteau est donné automatiquement en tenant compte du temps de réponse, aussi réduit que possible, de l'installation. Les corrections nécessaires sont faites automatiquement.

Le manipulateur peut seulement fonctionner pendant la course à vide du marteau. Le temps très faible dont il dispose a rendu nécessaire une augmentation de la rapidité des

Fig. VI-59 — Installation de forgeage automatique avec système électronique de contrôle intégré (*Schloemann-Fried, Krupp Schmiede und Gießerei*)



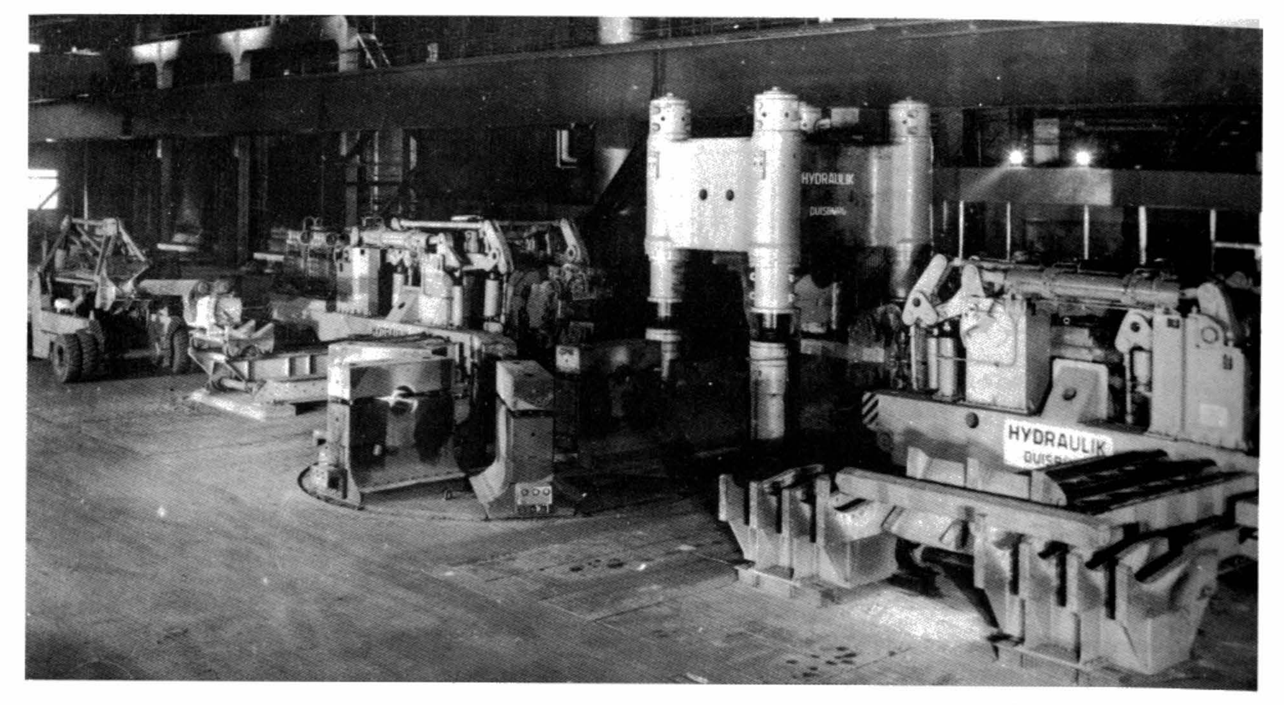


Fig. VI-60 — Deux manipulateurs intégrés de 160 kN.m, associés à une presse à cadence rapide de 30 MN ; à côté de la presse, le magasin à outillage de forme circulaire (*DEMAG Hydraulik, Duisburg Uddeholm*)

manipulateurs. C'est donc la presse qui commande le déroulement de l'opération. On réalise ainsi de grandes cadences qui peuvent atteindre 100 coups/mn lors des opérations de finition où la course du marteau est faible. En outre la précision de finition peut être réglée à ± 1 mm près, ce qui permet une réduction de la surépaisseur, avantageuse pour la fabrication des pièces de série et le

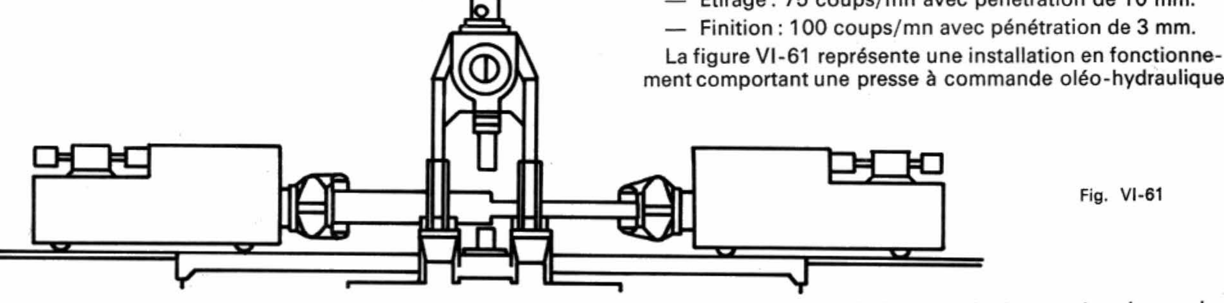


Fig. VI-61

forgeage des aciers et alliages spéciaux dont le prix est élevé.

La grande vitesse de l'opération permet de forger sans réchauffage intermédiaire des aciers spéciaux ou des métaux comme le titane dont le forgeage doit impérativement être réalisé dans un intervalle de températures très étroit sous peine d'entraîner l'apparition de criques.

L'automatisme s'étend aux opérations de changement des outillages.

La figure VI-59 (V. page précédente) représente une installation de forgeage automatique comportant une presse de 14 MN à 3 cylindres associée à un manipulateur de 160 kN.m. La presse à commande inférieure oléo-hydraulique comporte deux colonnes disposées obliquement permettant le changement rapide des outillages approvisionnés à partir d'un magasin relié à la table mobile. Le magasin est rectangulaire et animé d'un mouvement de translation. Il peut également être circulaire, la présentation des outils s'effectuant alors grâce à un mouvement de rotation (fig.VI- 60). La presse possède un dispositif de verrouillage automatique du marteau dont le changement est ainsi très rapidement réalisé.

Les transports de pièces se font à l'aide d'un engin spécialisé monté sur pneus. Le four de l'installation est à sole tournante. La commande intégrée permet les cadences suivantes :

— Étirage : 50 coups/mn avec pénétration de 40 mm.

— Finition : 90 coups/mn avec pénétration de 10 mm.

À titre de comparaison, une installation de même conception comportant une presse de 6,3 MN autorise les cadences ci-après :

— Étirage : 75 coups/mn avec pénétration de 10 mm.

— Finition : 100 coups/mn avec pénétration de 3 mm.

La figure VI-61 représente une installation en fonctionnement comportant une presse à commande oléo-hydraulique en sous-sol associée à deux manipulateurs dont la marche est commandée par des bandes perforées. La marche à deux manipulateurs évite le retournement des pièces en cours d'opération et permet le forgeage de barres ou ronds de grande longueur, sans risque de déformation due au porte-à-faux.

2.4.2. Machines à forger à marteaux multiples. — Les figures VI-62 et VI-63 représentent une installation entièrement automatique où le corps de la presse est remplacé par un bâti portant quatre marteaux fonctionnant simultanément, actionnés mécaniquement par l'intermédiaire de quatre excentriques (fig. VI-64).

La pièce est maintenue par deux manipulateurs montés sur glissières se faisant vis-à-vis, situés de part et d'autre du bâti. Cette installation est spécialement adaptée à la fabrication très rapide de ronds ou de pièces telles que les essieux de matériel de chemin de fer présentant des changements de section faibles ou variant progressivement. Ses performances sont quatre fois supérieures à celles d'un marteau-pilon. Le réglage du mouvement des marteaux est fait automatiquement en cours de fabrication suivant un programme enregistré sur bande perforée ce qui permet la répétition des opérations et, par là même, la réalisation de grandes séries.

Machines à forger à marteaux multiples

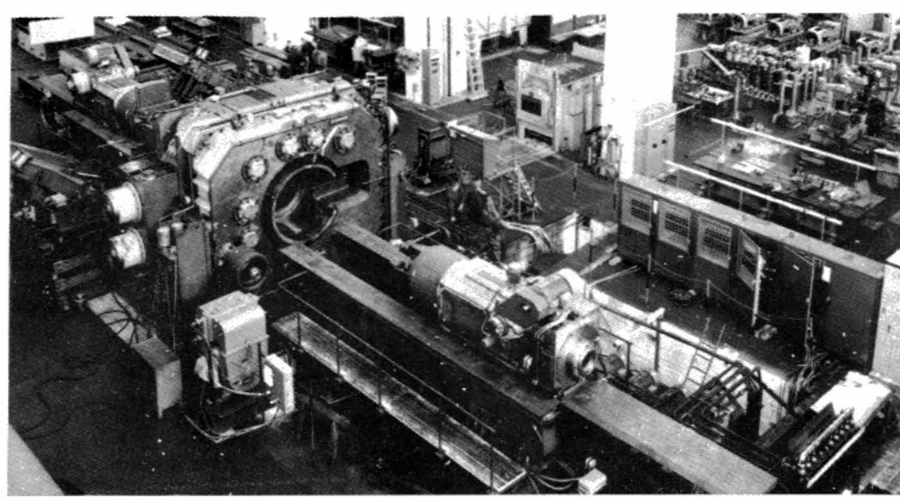


Fig. VI-62

(*Gesellschaft für Fertigung und Maschinenbau, Steyr*)

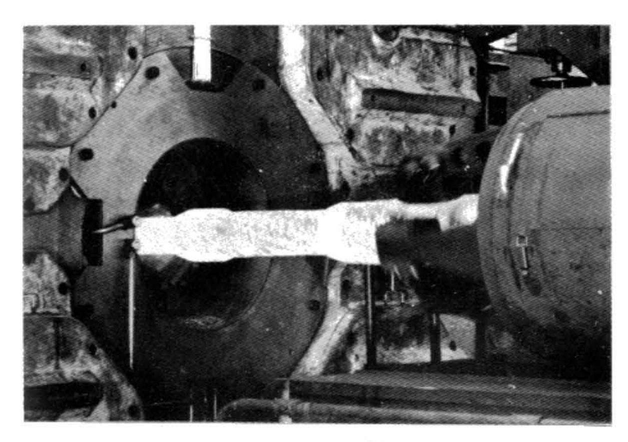


Fig. VI-63 (*GFM*)

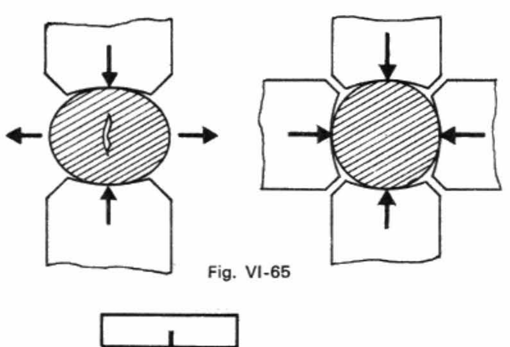


Fig. VI-65

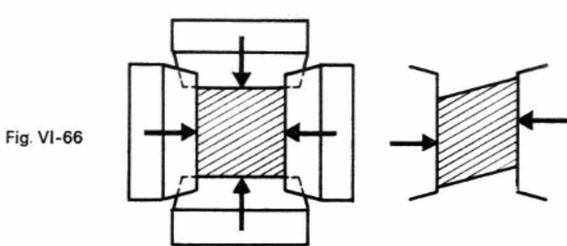


Fig. VI-66

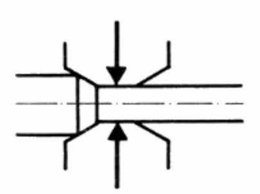


Fig. VI-64 — Disposition relative de la barre à forger et des marteaux

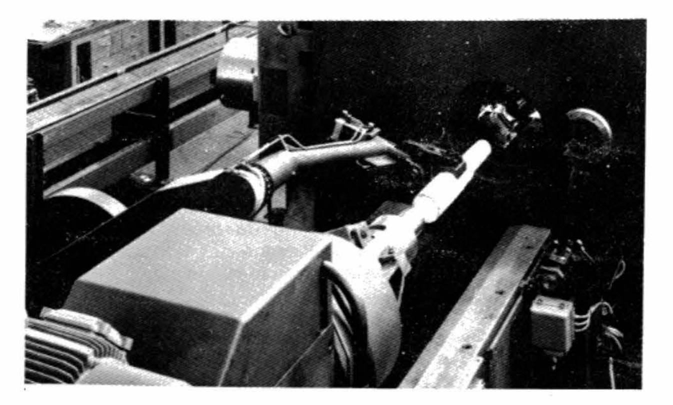
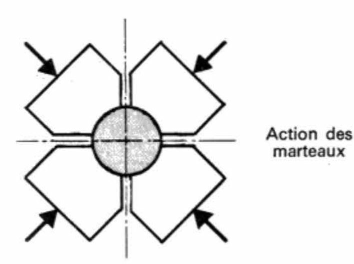


Fig. VI-67

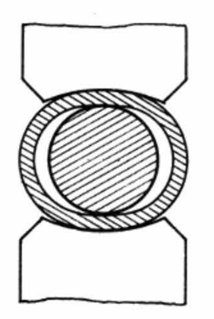
Opération de formage sur mandrin (*GFM*)



Action des marteaux

La forme des marteaux diffère suivant qu'il s'agit de pièces à section ronde ou carrée. Les figures VI-65 et VI-66 montrent que la disposition des marteaux permet d'éviter l'élargissement générateur de déchirures internes ainsi que les défauts d'équerrage. La précision est voisine de $\pm$ 0,5 mm.

Le procédé permet également de fabriquer des tubes forgés avec ou sans mandrin. La figure VI-67 représente une opération de forgeage sur mandrin. Cette méthode de forgeage évite l'ovalisation (fig. VI-68).



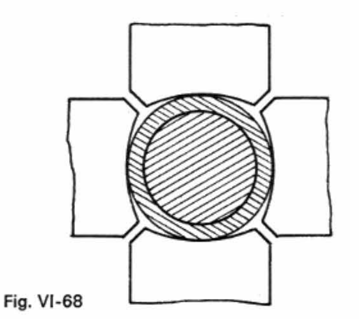


Fig. VI-68

3. TRAITEMENTS THERMIQUES ET USINAGE

À leur sortie de la presse, les pièces de forge ne présentent ni l'état de surface, ni la structure métallurgique permettant leur livraison à l'utilisateur.

Avant de quitter la forge elles doivent subir un ou plusieurs traitements thermiques ainsi qu'une ou plusieurs opérations d'usinage faisant partie intégrante de la fabrication.

3.1. Traitements thermiques

3.1.1. Traitement de précaution. — Ce traitement est effectué sur la pièce brute, aussitôt après sa sortie de la presse, en vue de l'amener à la température de l'atelier sans provoquer de défauts d'origine thermique tels que les tapures externes résultant de différences de vitesses de refroidissement aux températures où l'acier a perdu sa plasticité, et les flocons qui sont des tapures internes résultant du dégagement brutal, sous très forte pression, de l'hydrogène en solution dans le métal. Le phénomène se produit aux températures inférieures à 300 °C.

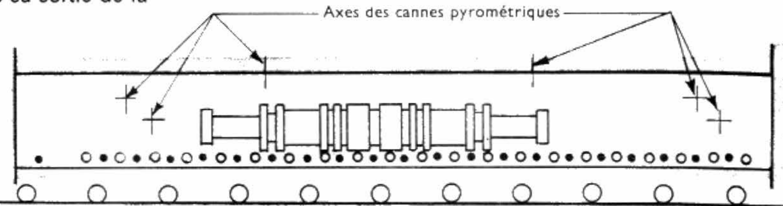


Fig. VI-69

Four de traitement à sole mobile chauffé au gaz naturel (*Fofumi*)

Le traitement de précaution peut également être conduit en vue de conférer au métal une structure facilitant les opérations d'usinage ou améliorant la perméabilité aux ondes ultrasonores employées pour les opérations de contrôle. Il vise aussi à donner à l'acier une structure homogène lui permettant de subir le traitement de qualité dans les meilleures conditions.

3.1.2. Traitement de qualité. — Ce traitement est destiné à conférer au métal les caractéristiques imposées par la spécification.

Il consiste en un chauffage à une température supérieure à 850 °C permettant d'obtenir une structure homogène (austénite), suivi d'un refroidissement. Ce refroidissement peut être fait : dans l'air (il s'agit alors d'une normalisation), par immersion de la pièce dans un liquide (eau ou huile) ou par pulvérisation d'eau sous forme de brouillard. On parle alors d'une trempe.

La trempe est suivie d'un réchauffage à une température modérée — généralement inférieure à 700 °C — appelé **revenu.** Les nuances spéciales appartenant à la catégorie des aciers fins peuvent subir des traitements thermiques plus complexes.

Le traitement de « normalisation » comportant un simple refroidissement à l'air peut être exécuté sur la pièce brute et se confond alors avec le traitement de précaution. Quand il précède une trempe, le traitement de précaution peut exiger une ou plusieurs normalisations à des températures décroissantes en vue d'obtenir une homogénéisation et un affinement de la structure.

La trempe par immersion et pulvérisation est normalement précédée d'un usinage conférant à la pièce une forme géométrique simple. Cet usinage est effectué à des cotes impliquant une surépaisseur par rapport à celles de la pièce finie ; cette surépaisseur peut atteindre 10 à 20 mm.

Remarque : Le refroidissement à l'air d'une pièce en acier allié produit le même résultat qu'une trempe et doit être suivi d'un revenu.

Des éléments tels que le nickel (jusqu'à 4 %), associé le plus souvent au chrome, au molybdène et au vanadium, peuvent ainsi être ajoutés à l'acier, soit pour remplacer la trempe dans le cas où sa réalisation est jugée impossible, soit pour la rendre plus efficace.

3.1.3. Traitement de stabilisation. — Ce traitement est destiné à éliminer les contraintes internes résultant, soit du traitement de qualité, soit d'un redressage destiné à corriger des déformations accidentelles.

Il doit être réalisé à une température inférieure à la température de revenu pour éviter de modifier les caractéristiques obtenues.

3.1.4. Installations de traitement thermique. — Si l'on fait abstraction des installations particulières destinées au traitement thermique des aciers fins (aciers à outils, aciers de construction alliés ou non), les fours de traitement de pièces de forge se divisent essentiellement en deux catégories :

— fours horizontaux à sole mobile dont la forme générale rappelle celle des fours de forge (fig. VI-69) ;

— fours verticaux circulaires (fig. VI-70).

Ces fours, où règnent des températures inférieures à 1 000 °C mais qui requièrent un réglage de grande précision, sont généralement chauffés au gaz ou au fuel et fréquemment aussi à l'électricité.

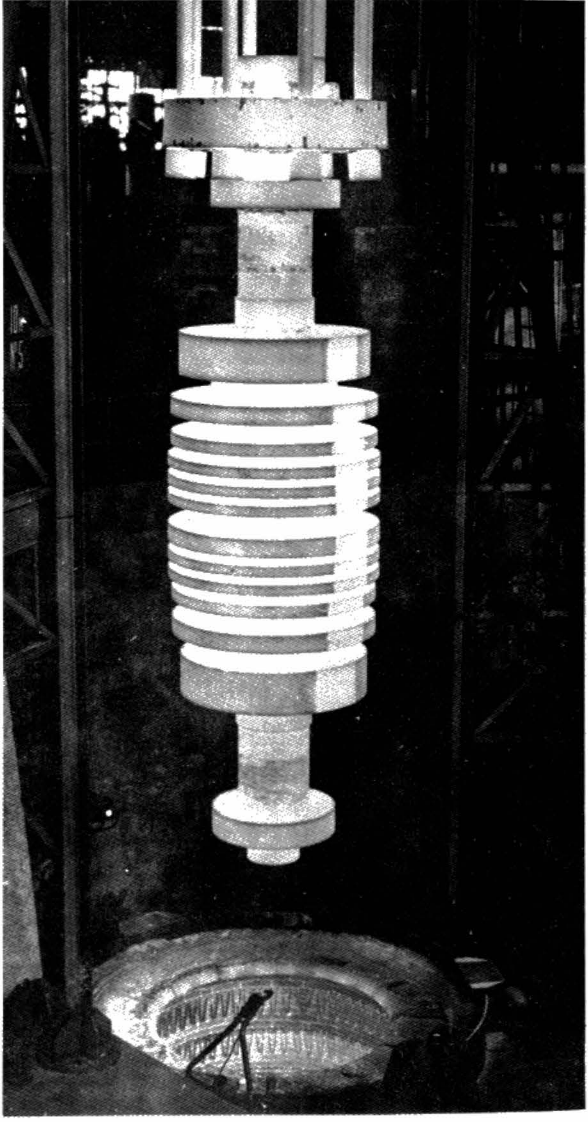


Fig. VI-70 — Four vertical circulaire ouvert (*Creusot-Loire*)

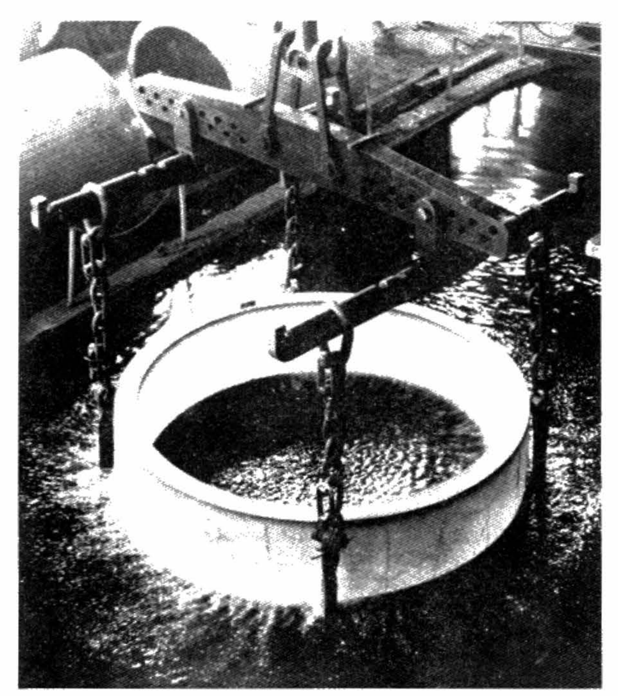


Fig. VI-71 — Trempe par immersion dans l'eau (*Creusot-Loire*)

La trempe par immersion (fig. VI-71) est effectuée dans des bacs remplis d'eau ou d'huile où la pièce se trouve en position horizontale ou verticale. La trempe par pulvérisation d'eau ou *trempe au brouillard* est réalisée sur des installations horizontales (fig. VI-72) ou verticales qui communiquent à la pièce un mouvement de rotation. L'opération s'effectue à l'aide de nombreux pulvérisateurs à débit réglable répartis sur des rampes. Un avantage de ce mode de traitement par rapport à la trempe dans un bain liquide est de permettre la réalisation de vitesses de refroidissement équivalentes sur les différentes parties des pièces, quelle que soit leur section. En fin d'opération on obtient ainsi une homogénéité de température beaucoup plus grande que lors d'une trempe par immersion.

3.2. Usinage. — Si l'on excepte certaines pièces telles que les vilebrequins fabriqués par contrepassement et torsion (pour lesquels l'opération de torsion est précédée d'un passage au tour des zones correspondant aux futurs tourillons) et les corps creux dont la partie axiale peut être éliminée par forage de l'ébauche, les opérations d'usinage sont toujours exécutées sur une pièce dont le forgeage est terminé.

Une partie de ces opérations est souvent réalisée avant les traitements comportant une trempe, en vue d'éliminer les défauts de surface éventuels, générateurs de tapures, ainsi que la calamine qui perturbe les échanges thermiques. Il s'agit de donner à la pièce une surface géométrique régulière.

L'autre partie est faite après le traitement thermique mais avant livraison à l'utilisateur, à des cotes fixées par ce dernier qui dispose d'un matériel spécialisé pour l'usinage définitif.

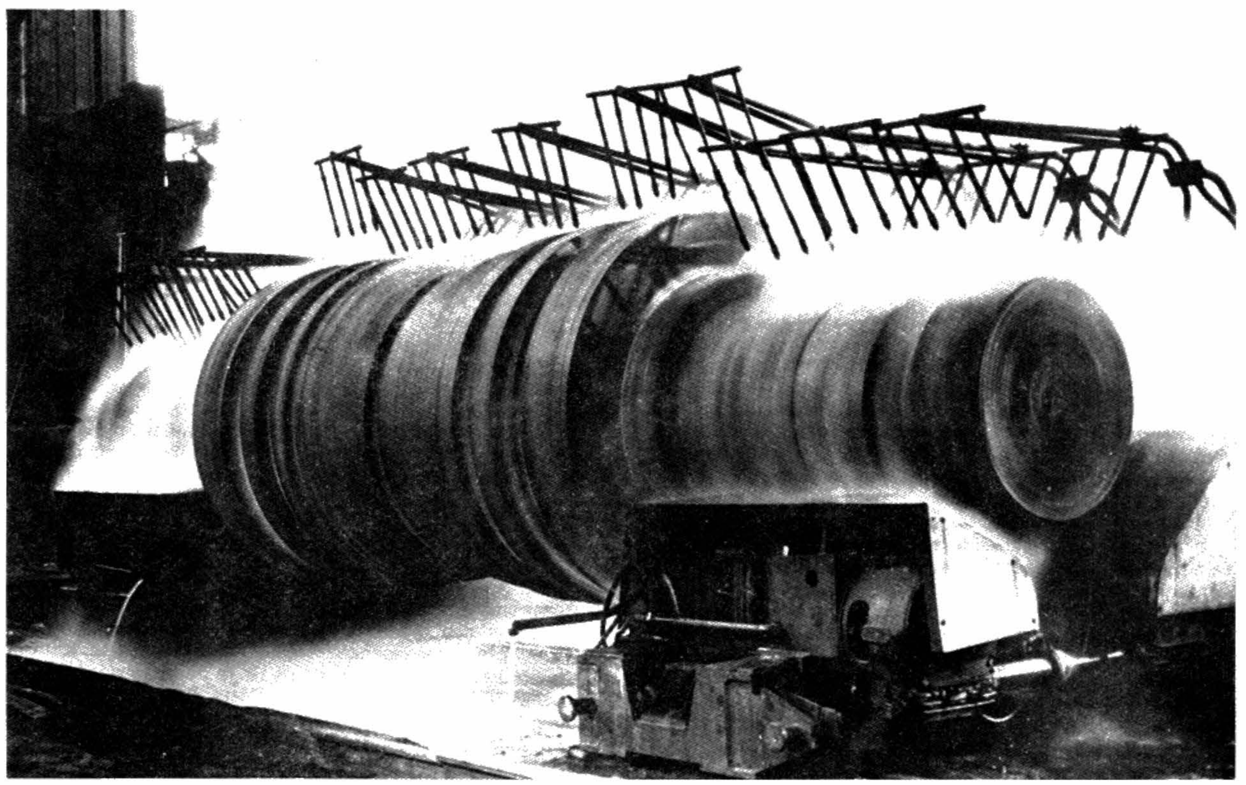
Pour ces raisons, une forge doit comporter une installation annexe d'usinage où se trouvent, en principe, rassemblés les matériels suivants :

— Scies circulaires et scies alternatives pour le sectionnage ;
— Tours verticaux et horizontaux ;
— Rabots ;
— Foreuses, aléseuses, rodeuses pour l'exécution et le polissage des trous axiaux ;
— Perceuses, etc.

4. PROCÉDÉS DE FORGEAGE PARTICULIERS

4.1. Fabrication des vilebrequins par fibrage intégral. — Les figures VI-32 à VI-34 font apparaître la complexité des opérations de forgeage dit en « *planche* » comportant des contrepassements suivis de torsion des tourillons. Elles montrent également qu'une perte de métal résulte des opérations d'usinage réalisées en vue du dégagement des tourillons.

Fig. VI-72 — Trempe d'un rotor par pulvérisation (*Creusot-Loire*)



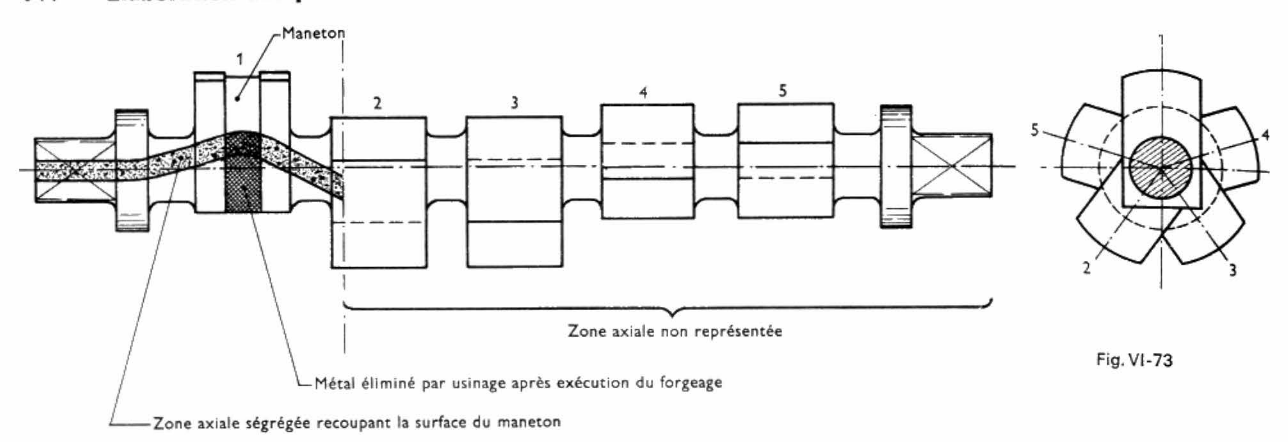


Fig. VI-73

L'évidement des manivelles, une fois le forgeage terminé, provoque une perte de métal supplémentaire (fig. VI-73). À ce moment les parties axiales du lingot les plus ségrégées viennent déboucher sur les surfaces usinées.

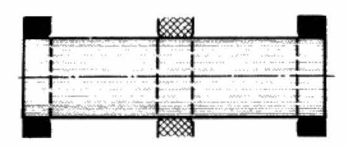
De plus la fibre du métal résultant de l'orientation, dans le sens de l'allongement de la pièce, des inclusions et ségrégations mineures, est mise à jour au moment de l'usinage. Cette mise à jour de la fibre, impossible à éviter dans un grand nombre de pièces forgées, n'entraîne généralement pas d'inconvénient majeur. Seules les pièces soumises à des efforts alternés importants voient leur résistance abaissée. Les petites pièces, telles que les bielles et les vilebrequins en mouvement dans des moteurs alternatifs rapides, subissent de très hautes sollicitations alternées. Leur fabrication par estampage en matrice évite la mise à jour des fibres au cours de l'usinage.

Les vilebrequins de plus grandes dimensions, destinés à des moteurs à marche lente, fabriqués par forgeage au marteau subissent des sollicitations alternées moins grandes que celles des petites pièces. Néanmoins, leur résistance est abaissée par la mise à jour des fibres, en particulier dans la zone des congés.

Le procédé de « *fibrage intégral* », dérivé de l'estampage, remédie aux inconvénients résultant des pertes de métal et de la mise à jour des fibres. Il permet en effet d'effectuer toutes les opérations par *déformation à chaud.*

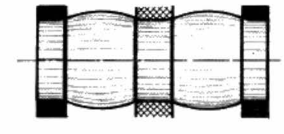
Son principe est le suivant :

La pièce de départ est un rond forgé, divisé en sections correspondant aux futurs manetons, que l'on fixe sur un outillage monté lui-même sur une presse (fig. VI-74a).

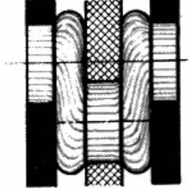




a) Ébauche au départ



b) Ébauche après refoulement



c) Opération terminée

Fig. VI-74

(*Creusot-Loire*)

Chacune des sections est tout d'abord soumise à un double refoulement longitudinal destiné à donner la forme d'un diabolo aux deux zones correspondant aux futurs flasques (fig. VI-74 b). L'opération suivante, effectuée avec le même outillage, comporte un cambrage et un écrasement simultanés (fig. VI-74c). Le cambrage vertical a pour but d'excentrer le maneton.

L'écrasement horizontal transforme en flasques du vilebrequin les boules du diabolo dont la section circulaire prend la forme d'une ellipse.

L'opération est répétée autant de fois que le vilebrequin compte de manetons, chacune des sections venant prendre la place de la précédente sur l'outil. Le calage des manetons est réalisé avant l'opération. Leur position angulaire est ainsi obtenue au cours même du forgeage, ce qui évite les opérations de torsion des tourillons.

La précision atteinte permet de ne pas usiner les parties extérieures et les faces des flasques, l'usinage se limitant aux soies et aux tourillons.

Le procédé permet de fabriquer des vilebrequins monobloc à plusieurs coudes de 600 mm de course. La résistance aux efforts alternés des vilebrequins réalisée par ce procédé ou par des procédés analogues est supérieure de 20 % environ à celle des vilebrequins fabriqués en planche.

4.2. Fabrication de couronnes sur laminoir vertical. — Cette fabrication relève de la forge. Le laminage est d'ailleurs précédé par le forgeage d'une ébauche pleine, ensuite percée à l'aide d'un poinçon vertical. L'opération elle-même constitue une variante du bigornage qui permet d'obtenir des pièces de grand diamètre.

La méthode s'inspire de la fabrication des bandages de chemin de fer par le procédé de laminage vertical mis au point il y a une centaine d'années.

Le marteau et l'enclume sont remplacés par deux cylindres verticaux se faisant vis-à-vis dont la longueur est au moins égale à la largeur de la couronne à réaliser (V. hors-texte).

Des galets verticaux jouent le rôle de guides. L'appareil est généralement complété par des galets horizontaux exerçant une action verticale en vue d'obtenir des tranches rigoureusement planes.

Des variantes du procédé permettent d'obtenir des sections de forme plus compliquée.

5. TENDANCES ACTUELLES DE LA FORGE

5.1. Forge moyenne et forge légère. — Ces forges suivent une évolution marquée, comme on l'a vu, par le développement de l'automatisme des presses et manipulateurs.

Cette évolution présente un intérêt sur le plan économique où elle se traduit par une élévation sensible de la productivité. Elle offre également l'avantage d'améliorer les performances techniques des installations en donnant la possibilité de transformer, dans de meilleures conditions, les alliages présentant un intervalle étroit de températures de forgeage, c'est-à-dire qui requièrent des manutentions et une transformation aussi rapides que possible.

5.2. Grosse forge. — La grosse forge se trouve principalement confrontée avec le problème de l'augmentation du poids des pièces, donc de celui des lingots. À titre d'exemple, la puissance maximale des groupes turboalternateurs est passée, au cours de la dernière décennie, de 250 MW à 650 MW environ. Cette évolution se traduit, malgré les dispositions adoptées par les constructeurs, par une augmentation sensible du poids des pièces tournantes donc de celui des lingots.

Des lingots de 300 t et même 400 t ont déjà été fabriqués. L'obtention et la mise en œuvre de lingots de 300 t et plus ne se heurtent pas à des obstacles majeurs d'ordre technologique. Déjà avant la guerre 1939-1945 des lingots de 300 t étaient forgés sur des presses de 150 MN en vue de la fabrication de corps creux. Mais dans les corps creux, l'élimination par perçage ou forage de la zone située au cœur du lingot, s'accompagne de la disparition des porosités axiales ainsi que des ségrégations et inclusions les plus importantes. Les lingots destinés à la fabrication des rotors de groupes turboalternateurs doivent au contraire présenter, dans la totalité de leur volume, une homogénéité de composition sans laquelle les caractéristiques exigées ne peuvent être obtenues. Cette homogénéité est incompatible avec la présence de ségrégations accentuées.

Une limite est ainsi inévitablement fixée aux dimensions des lingots fabriqués par le procédé classique qui consiste à couler le métal dans une lingotière où il se solidifie lentement.

5.2.1. Refusion d'électrodes consommables. — La grosse forge peut tout d'abord se tourner, comme elle l'a déjà fait pour l'élimination des flocons, vers une modification du procédé d'élaboration. La lutte contre les flocons exigeait un dégazage effectué par maintien prolongé de la pièce à 600 °C environ. Ce dégazage est maintenant assuré par la coulée sous vide.

Pour lutter contre les ségrégations on a songé à remplacer la solidification lente à partir des parois de la lingotière par une solidification rapide, figeant en quelque sorte le métal aussitôt après son élaboration sans donner aux ségrégations le temps de se développer.

La méthode consiste à produire le métal dans la lingotière elle-même où il se solidifie au fur et à mesure de son élaboration. Une électrode dite « *consommable* » est refondue par effet Joule grâce au passage d'un courant. La partie liquide du lingot au contact de l'arc occupe un faible volume et la solidification intervient rapidement grâce à l'évacuation de la chaleur par le métal déjà refroidi qui se trouve au-dessous de lui (fig. VI-75).

La protection du bain liquide contre l'oxydation par l'atmosphère se fait soit en recouvrant la surface du métal liquide par un laitier électroconducteur assurant le passage du courant, soit en réalisant l'opération à l'intérieur d'une chambre à vide.

Les deux procédés appelés respectivement **refusion sous laitier** et **refusion sous vide** se trouvent quelque peu en concurrence. La refusion sous laitier dérive du procédé de soudage sous laitier de parois de très forte épaisseur de pièces chaudronnées.

La refusion sous vide a été mise au point en vue de la production d'alliages et de métaux spéciaux nécessitant une très grande pureté.

Des lingots proches de 50 t ont déjà été fabriqués par l'un et l'autre des deux procédés. Le rendement du lingot, égal au rapport de la masse du métal après élimination des chutes à la masse du métal coulé, passe de 65 % environ à 90 %.

À l'heure actuelle, où la masse des lingots refondus à partir d'électrodes consommables reste encore limitée, ce procédé est utilisé à la fabrication de pièces délicates telles que les cylindres de laminoirs à froid, les cylindres de calandres ou les blocs matrices d'estampage.

Les cylindres de laminoirs à froid qui subissent une trempe très énergique en vue du durcissement superficiel de la table, tendent à s'écailler si des inclusions d'assez grandes dimensions affectent la zone soumise aux contraintes résultant du traitement. La refusion d'électrodes consommables permet l'élimination de ces inclusions.

Les cylindres de calandre à surface polie destinés à la fabrication de feuilles très minces, de revêtements de bandes magnétiques, ne peuvent supporter la présence d'inclusions superficielles qui entraîneraient des marques à la surface des produits. Malheureusement, ces inclusions n'apparaissent qu'au moment de l'usinage de finition. La refusion d'électrodes consommables a entraîné d'importants progrès.

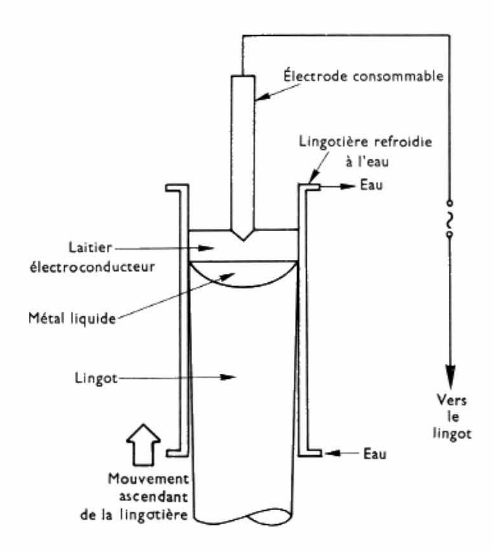


Fig. VI-75 — Schéma de principe d'une installation de refusion sous laitier électroconducteur

En ce qui concerne les matrices d'estampage, l'emploi d'aciers obtenus par refusion d'électrodes consommables se traduit par une augmentation sensible de leur durée de vie. Ces dernières peuvent ne subir qu'un faible corroyage et même être utilisées sans avoir été forgées.

La possibilité que donne le métal obtenu par refusion d'électrodes consommables de limiter le taux de corroyage grâce à son homogénéité et à sa compacité permettra de réduire sensiblement les opérations d'ébauchage et de fabriquer des pièces de grandes dimensions sans accroître parallèlement la force des engins de forgeage.

5.2.2. Assemblage d'ébauches par soudage. — Un moyen d'éviter l'élaboration de très gros lingots est offert par le soudage d'ébauches forgées à partir de lingots fabriqués par le procédé classique de coulée et de solidification en lingotière. Ce procédé, comme la refusion sous laitier, dérive du soudage de parois de très forte épaisseur de pièces chaudronnées.

Les ébauches assemblées par soudage sont à nouveau forgées en vue de soumettre à un corroyage suffisant le métal déposé par soudage.

CHAPITRE VII

ESTAMPAGE

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Définition. — L'estampage est une technique de mise en forme des métaux. Le matériau, le plus souvent préalablement chauffé, est soumis à des efforts suffisants pour vaincre sa résistance propre et le faire s'écouler dans des moules métalliques appelés *matrices* où il prend la forme désirée.

1.2. Les matériaux. — On estampe presque tous les métaux et alliages et parmi les plus répandus, les aciers, les laitons, les alliages d'aluminium et de titane, et les alliages réfractaires. Les métaux se présentent sous forme de barres de sections géométriques simples (ronde, carrée, rectangulaire, tubulaire) obtenues par laminage ou filage; dans certains cas particuliers elles ont subi des opérations complémentaires d'écroutage ou d'étirage par exemple.

1.3. Applications. — L'estampage est particulièrement adapté dans les cas suivants:

— Fabrication de grande série, car il permet d'obtenir une bonne constance de forme et de caractéristiques métallurgiques, particulièrement recherchée en usinage.

— Fabrication de pièces fortement sollicitées et de haute fiabilité, car il met en œuvre des métaux homogènes et sains et oriente les fibres du métal dans le sens le plus favorable à la résistance de la pièce (fig. VII-1).

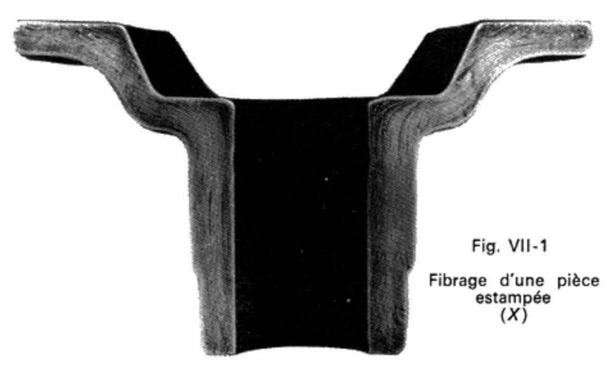


Fig. VII-1
Fibrage d'une pièce estampée
(*X*)

— Fabrication de pièces de géométrie complexe qui nécessiteraient beaucoup de matière et de temps s'il fallait les obtenir par usinage seul.

Cependant, il faut avoir présent à l'esprit que la production des pièces estampées met en œuvre des matériels puissants et coûteux, des outillages de fabrication délicate dont la durée est limitée par une usure relativement rapide et que les pièces produites présentent des caractéristiques résultant:

● des outillages: le procédé consistant à serrer le métal entre deux demi-matrices entraîne l'existence d'un joint de matrices et de dépouilles de part et d'autre de ce joint pour permettre le démoulage (fig. VII-2);

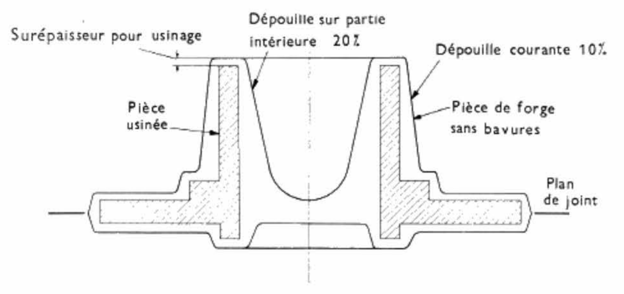


Fig. VII-2 — Estampage d'un moyeu

● du travail à chaud, qui se traduit par des imperfections de surface telles qu'oxydation et décarburation, par exemple, dans le cas des aciers;

● de la précision dimensionnelle du procédé tributaire des tolérances d'exécution des matrices, des variations de la température de forgeage, de l'usure des matrices, de la précision des machines, de leur état mécanique et du soin apporté à la surveillance des fabrications.

1.4. Le procédé. — Les différentes phases de fabrication d'une pièce estampée peuvent se résumer ainsi:

1.4.1. Étude et préparation. — À partir du dessin de la pièce terminée il convient:

— de définir un dessin de pièce brute susceptible d'être forgée,

— de choisir les moyens de fabrication nécessaires,

— de déterminer les dimensions de la matière à approvisionner,

— d'étudier la séquence des opérations de déformation et par suite les outillages de fabrication.

Parallèlement, on choisit les aciers d'outillage et les moyens de fabrication des outillages.

1.4.2. Réalisation. — La fabrication comprend:

— Le tronçonnage des barres en *lopins* de dimensions convenables pour faire une pièce (ou une grappe de pièces).

— Le chauffage des lopins.

— L'estampage proprement dit qui peut comporter plusieurs opérations successives de déformation pour obtenir, la forme désirée dans les meilleures conditions (absence de défaut et économie de matière). En fonction du choix fait dans la conception des outillages, on a à éliminer des bavures dues au surplus de matière qui s'écoule en débordement après remplissage des matrices, (fig. VII-3 et VII-4).

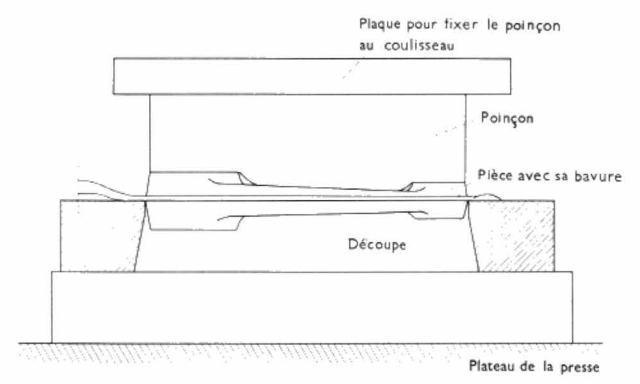


Fig. VII-3 — Outillage d'ébavurage d'un levier

— Le traitement thermique qui donne à la pièce les caractéristiques métallurgiques recherchées.

— Le parachèvement qui, selon les cas, comprend :

- Un nettoyage des pièces par sablage, grenaillage ou décapage à l'acide pour éliminer l'oxyde qui recouvre les pièces après travail à chaud.
- Un meulage des bavures.

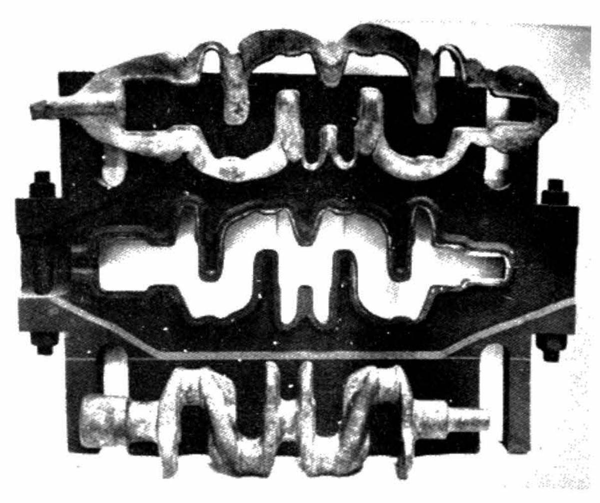


Fig. VII-4 — Ébavurage d'un vilebrequin (*Deloro-Stellite*)

- Un calibrage à froid qui améliore la précision de certaines cotes.
- Un redressage.
- Des opérations de contrôle qui assureront au client la conformité des pièces en ce qui concerne la géométrie, son absence de défauts et ses caractéristiques mécaniques.

Fig. VII-5 — Mouton à chaîne (*EUMUCO*)

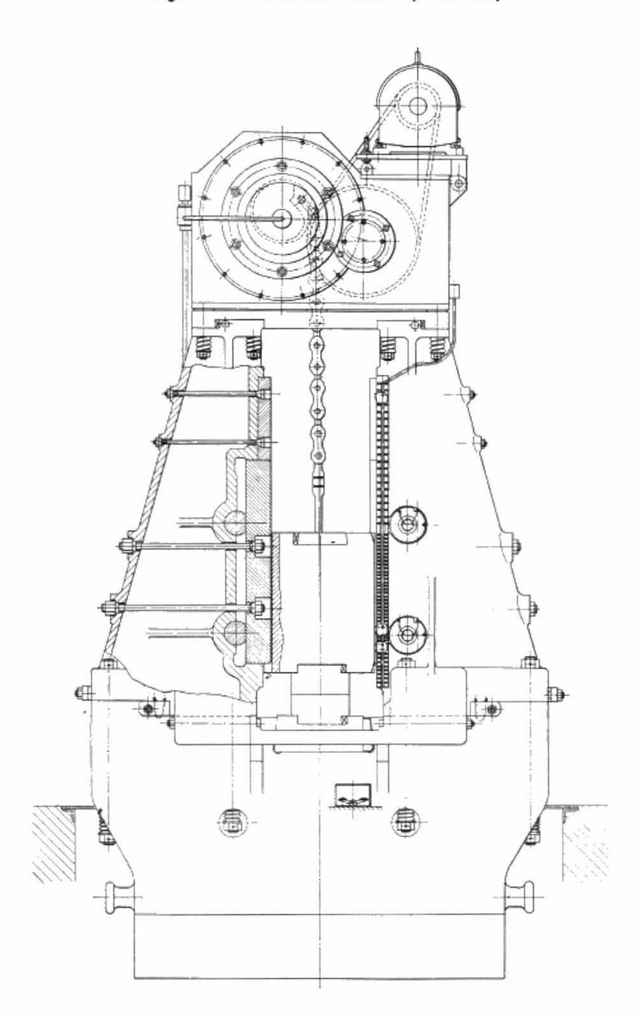
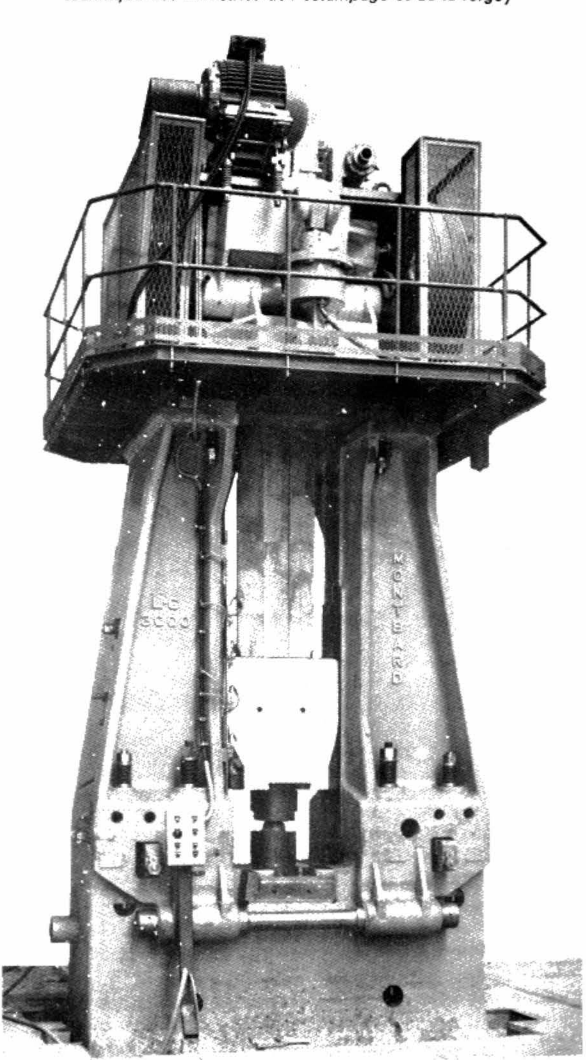


Fig. VII-6 — Mouton à planche (*Association pour le développement technique des industries de l'estampage et de la forge*)



2. MATÉRIELS

2.1. Machines d'estampage. — Les machines utilisées en estampage peuvent être classées en :

2.1.1. Machines travaillant par choc. — Ce sont :

1° *Les moutons et marteaux-pilons « simple effet »* qui comportent : une **chabotte,** masse métallique servant de table de travail et sur laquelle on fixe la matrice inférieure, un **marteau,** masse tombante sur laquelle est fixée la matrice supérieure, des **organes de guidage,** jambages ou montants fixés sur la chabotte et portant des glissières dans lesquelles la masse tombante est guidée, des **organes de relevage** de la masse tombante supportés par les jambages et qui, par leur nature, caractérisent le type du mouton : moutons à corde (lorsque le marteau est relevé au moyen d'une corde), à courroie, à chaîne (fig. VII-5), ou à planche (fig. VII-6). On ne construit plus que ces deux dernières catégories de moutons, et leur diffusion est très restreinte. Ce sont cependant les machines les plus économiques sur le plan de la consommation d'énergie, mais leur rythme est assez lent et leur puissance est limitée (on ne dispose que de l'énergie résultant de la chute libre de la masse tombante, fonction de la masse et de la hauteur de chute).

Les marteaux-pilons simple effet sont une variante de mouton, dans laquelle le relevage est assuré au moyen d'un cylindre pneumatique ou hydraulique (fig. VII-7).

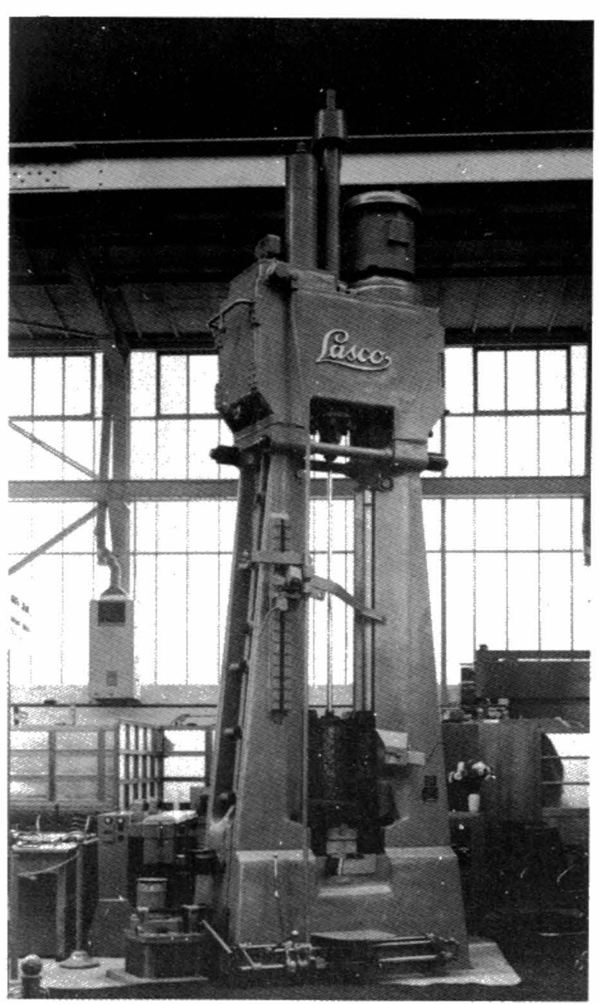


Fig. VII-7 — Marteau-pilon simple effet de 13,60 kJ, à relevage hydraulique (*Langenstein et Schemann*)

2° *Les marteaux-pilons double effet* appelés aussi « pilons matriceurs » (fig. VII-8). Ces machines représentent une amélioration des moutons à chute libre. Ils comportent comme eux une chabotte, des jambages avec glissières et

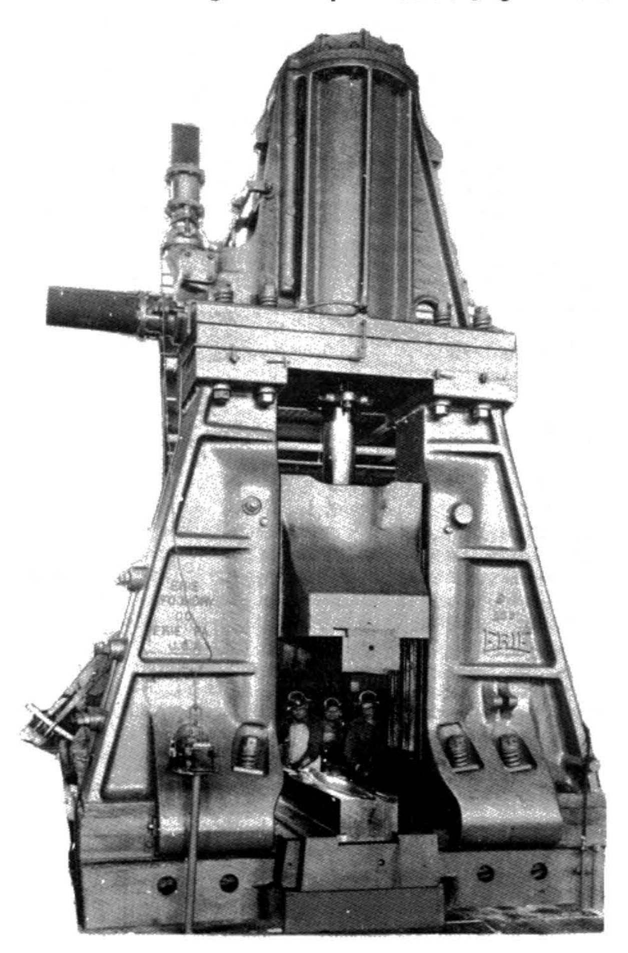


Fig. VII-8 — Marteau-pilon double effet (*Erié-ADETIEF*)

une masse tombante, mais celle-ci est reliée par une tige au piston d'un cylindre à double effet. Le marteau étant en haut de sa course, on admet le fluide moteur au-dessus du piston, ce qui a pour effet d'accélérer considérablement la vitesse du marteau, et par conséquent d'augmenter l'énergie emmagasinée. La vitesse de ces marteaux est en général deux à trois fois plus grande que celle des moutons. Le fluide moteur est de la vapeur d'eau ou de l'air comprimé sous pression de 7 bars en général.

Sur les installations existantes on a tendance à remplacer la vapeur par l'air comprimé pour se libérer des contraintes de production de vapeur ; cependant le rendement est plus faible car le remplissage du cylindre est plus lent avec l'air comprimé qu'avec la vapeur : la productivité se trouve réduite.

On construit des pilons double effet de toutes dimensions ; leur capacité caractérisée par l'énergie maximale disponible à chaque frappe peut atteindre 600 kJ.

3° *Les marteaux-pilons à « contre-frappe »*. — Dans ces machines qui sont des pilons à double effet perfectionnés, on a remplacé la chabotte par un second marteau travaillant en opposition avec le marteau supérieur. Les deux marteaux sont synchronisés par une liaison mécanique ils se heurtent à mi-distance et leurs énergies s'ajoutent.

Les avantages de ces machines sont surtout sensibles dans le cas de grandes capacités ; leur principe supprimant les réactions de frappe sur le sol permet de supprimer la chabotte et de réduire considérablement le volume des fondations. Ces éléments sont très importants dans les pilons double effet. À titre d'exemple, la chabotte d'un pilon de 35 kJ ne pèse pas moins de 30 t et repose, par l'intermédiaire d'un matelas de bois de 1,5 m d'épaisseur, sur un massif de béton très important.

Les pilons à contre-frappe se construisent pour des capacités de 150 à 600 kJ.

L'inconvénient de ces pilons est d'entraîner une perte de temps. La pièce, placée sur la matrice inférieure, se

déplace avec le marteau inférieur et dans ces conditions il n'est pas possible de rester entenaillé pendant le travail. La perte de temps entraînée par la reprise en tenailles des pièces après chaque frappe interdit l'utilisation de ces pilons pour la fabrication de pièces de faibles dimensions exigeant une productivité élevée.

4° *Les machines à haute énergie.* — Pour augmenter l'énergie disponible à chaque frappe, l'action sur la vitesse est très intéressante (fig. VII-9). Pour obtenir une augmentation de la vitesse d'impact lorsque la course de la masse tombante est fixée, on agit sur l'accélération, et par conséquent sur la force appliquée à la masse.

Dans une machine à haute énergie le marteau est relié par une tige au piston d'un cylindre pneumatique comme dans un marteau pilon classique. Il est verrouillé en position haute et dans la partie du cylindre située au-dessus du piston on admet un gaz (air ou azote) sous une pression proche de 150 bars. Pour frapper, on déverrouille le marteau. Avec ce système on atteint des vitesses d'impact qui sont voisines de 20 m/s. La technologie de construction est telle qu'il n'y a pas de réaction de choc sur le bâti, ni, par conséquent, sur les fondations.

Ce procédé permet de disposer d'une énergie considérable, 500 kJ par exemple, avec des machines d'encombrement relativement faible. Ces machines peuvent être utilisées pour fabriquer des pièces présentant des nervures et des toiles minces difficiles à obtenir par les procédés classiques.

Cependant, le développement de cette technique reste très limité du fait de la durée réduite des outillages d'estampage soumis à des contraintes considérables et à une usure très rapide.

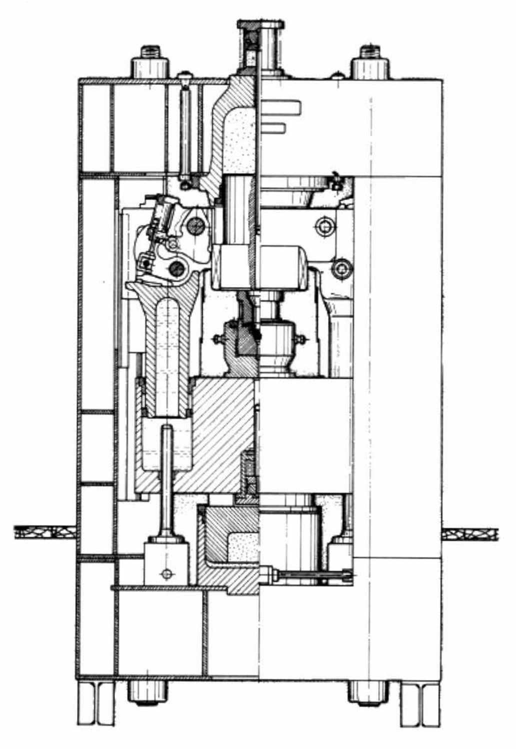


Fig. VII-9 — Schéma d'une machine à estamper à haute énergie (*Weingarten*)

5° *Machines diverses.* — Les constructeurs de machines se sont efforcés de mettre à la disposition des estampeurs des machines automatiques travaillant par choc, très intéressantes pour la fabrication de séries importantes. Nous citerons pour mémoire les machines à marteler Von Roll qui permettent d'obtenir des pièces longues de révolution, présentant des épaulements de diamètres différents ainsi que les machines Impacter qui reproduisent le procédé des pilons à contre-frappe dans une disposition horizontale et qui sont utilisées dans la production de chapelets de petites pièces.

2.1.2. Les presses à vis. — Ces machines, appelées également **balanciers** ou **presses à friction,** sont intermédiaires entre les machines travaillant par choc et celles travaillant par pression.

Elles s'apparentent aux premières en ce qu'en fin de frappe les matrices supérieure et inférieure viennent en contact. Leur vitesse d'impact se rapproche de celle des presses mécaniques et l'énergie disponible est accumulée dans un volant comme dans les presses mécaniques.

Ces machines comportent un bâti fermé dont les montants servent au guidage d'un coulisseau. Le mouvement du coulisseau est obtenu par un système vis-écrou dans lequel la vis (ou l'écrou) est mise en rotation.

Dans la construction la plus classique (fig. VII-10) l'arbre moteur porte deux plateaux qui entraînent par friction un volant claveté sur la vis. Suivant que l'on met au contact du volant l'un ou l'autre des plateaux, on peut inverser le sens de rotation et commander la descente ou la remontée du coulisseau.

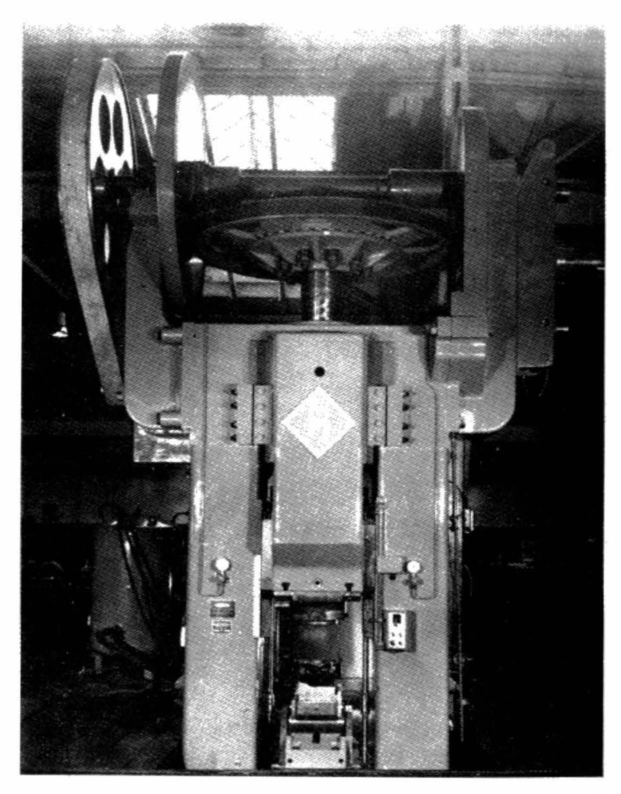


Fig. VII-10 — Presse à vis à entraînement par plateau (*Hasenclever*)

Dans une construction plus moderne (fig. VII-11) le volant est constitué par le rotor d'un moteur électrique qui entraîne la vis. L'inversion du sens de rotation du moteur commande le sens du mouvement du coulisseau.

Les presses à vis sont disponibles jusqu'à une capacité de 50 000 kN.

2.1.3. Les machines travaillant par pression. — En estampage, il s'agit, dans la majorité des cas, de presses mécaniques rapides. Elles ont complètement remplacé les pilons dans les ateliers fabriquant des pièces en grande série car leur productivité est meilleure ; elles nécessitent une main-d'œuvre moins qualifiée et se prêtent mieux à la mécanisation.

1° *Presses verticales* (fig. VII-12). — Dans la construction la plus répandue, ces machines comportent un bâti fermé dont la partie inférieure forme table de travail ; elle est reliée à la partie supérieure par quatre colonnes.

Un coulisseau se déplace verticalement dans ces colonnes, actionné par un système bielle-manivelle. Le vilebrequin tourillonne dans la partie supérieure du bâti et porte, à une extrémité, un embrayage pneumatique à disques et, à l'autre,

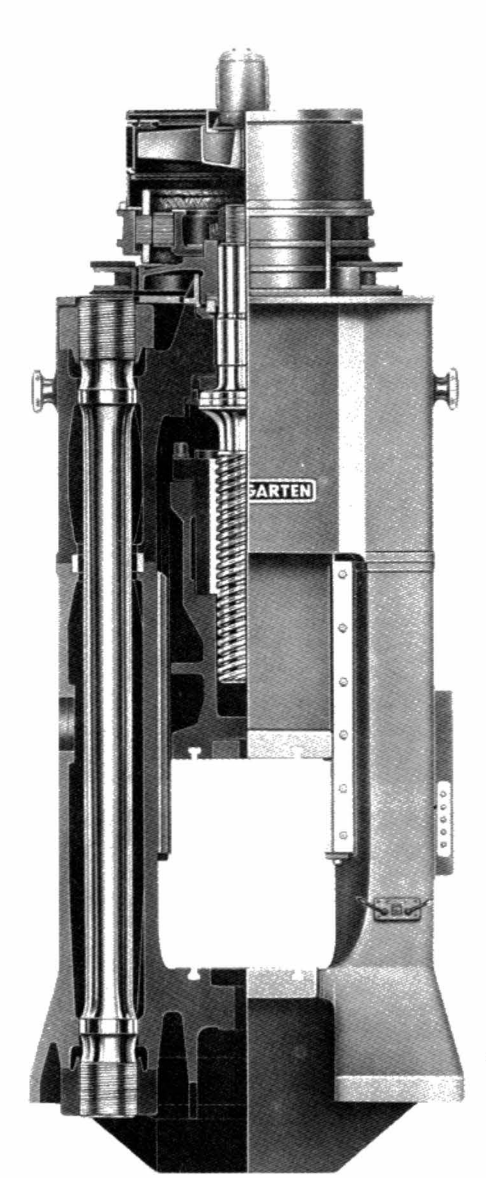


Fig. VII-11

Presse à vis à entraînement direct (*Weingarten*)

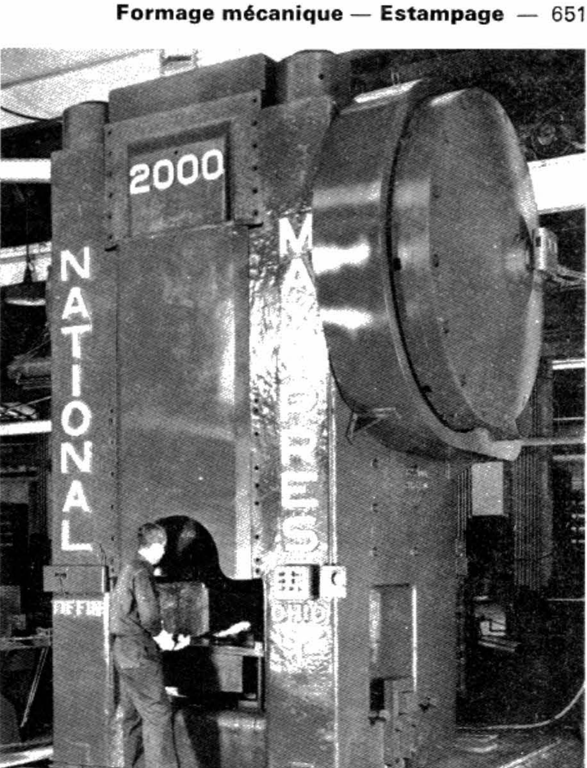


Fig. VII-12 — Presse verticale rapide de 20 000 kN (*National Machinery Co—J.G. Kayser*)

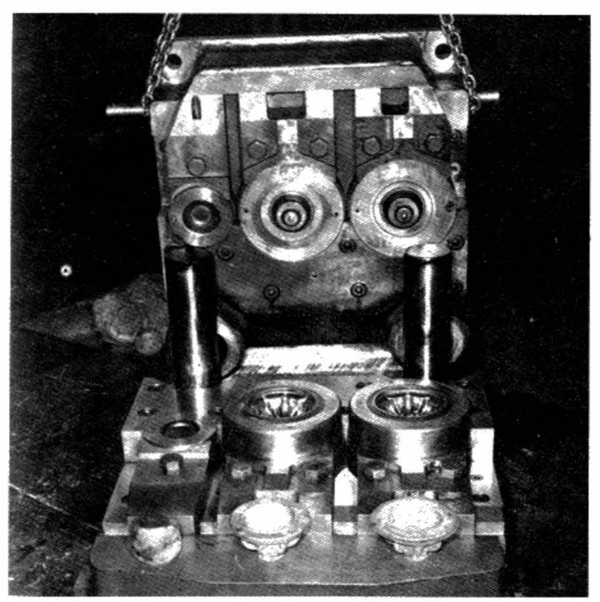


Fig. VII-13 — Porte-outils et outillage de presse verticale (*National Machinery Co. — J.G. Kayser*)

un frein pneumatique à disque ou à bande. Le carter d'embrayage muni d'une couronne dentée est entraîné par l'intermédiaire d'un arbre grande vitesse portant un volant accumulateur d'énergie et un pignon. L'entraînement de l'arbre grande vitesse se fait par courroies trapézoïdales. Ces presses sont équipées d'éjecteurs permettant d'extraire les pièces des matrices, et par suite de réduire considérablement la dépouille sur les pièces.

On construit ces machines dans la gamme de 6 000 à 100 000 kN. La vitesse varie à l'inverse de la force nominale, elle est proche de 70 coups par minute pour une presse de 25 000 kN et de 30 coups par minute pour une presse de 80 000 kN. L'estampage se fait en général en plusieurs opérations et l'outillage comporte côte à côte des matrices de préformage, d'ébauche et de finition (fig. VII-13).

Ces machines ne permettent pas d'exécuter économiquement des opérations d'étirage telles qu'elles sont pratiquées sur pilons. Lorsque la pièce à estamper nécessite une telle opération, on l'exécute sur une machine annexe telle que laminoir ébaucheur ou pilon ébaucheur.

Dans cette catégorie de machines, il faut citer la *presse à coin* (fig. VII-14) dans laquelle le mouvement du coulisseau est commandé par l'action d'un coin. Cette technologie permet de mieux absorber les forces lorsque l'estampage se fait hors de l'axe de la machine.

Contrairement aux pilons, lorsque la presse est au point mort bas il subsiste toujours un jeu entre matrices.

2° *Presses hydrauliques* (fig. VII-15). — Ces presses ne sont que très rarement utilisées en estampage. On leur reproche en particulier leur lenteur, et elles ne peuvent être compétitives que dans des fabrications de petites séries de pièces de grandes dimensions.

3° *Machines à forger horizontales* (fig. VII-16). — Ces machines sont plus particulièrement destinées à la fabrication de pièces par refoulement en bout de barres. Une fabrication typique est celle des arbres de roues de camions.

Leur principe est de serrer la barre à forger entre une demi-matrice fixe et une demi-matrice se déplaçant avec un coulisseau latéral, puis de refouler l'extrémité de la barre à l'aide de poinçons fixés sur le coulisseau principal longitudinal (fig. VII-17 et VII-18).

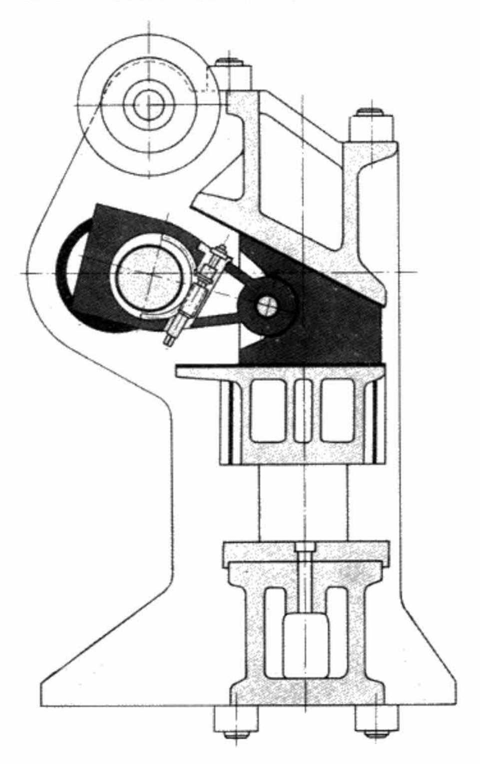


Fig. VII-14 — Schéma d'une presse à coin (*EUMUCO*)

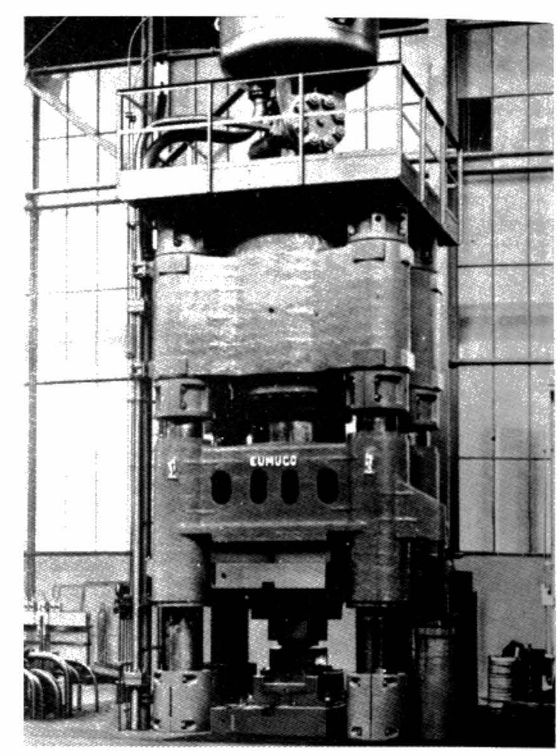


Fig. VII-15

Presse hydraulique estamper de 60 000 kN (*EUMUCO*)

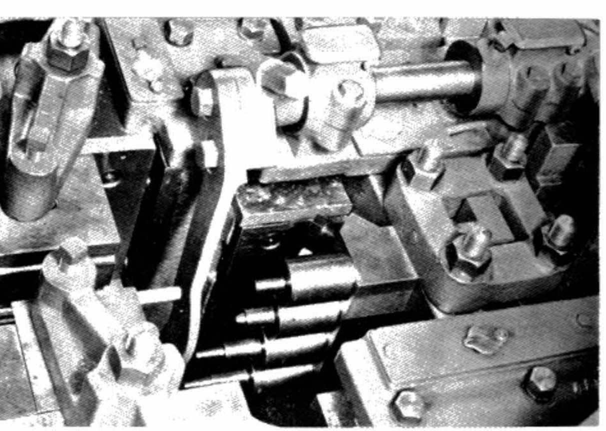


Fig. VII-17

Outillage de machine à forger (*Ajax-Rapid photo Company*)

Fig. VII-16 — Machine à forger horizontale (*Ajax-Rapid photo Company*)

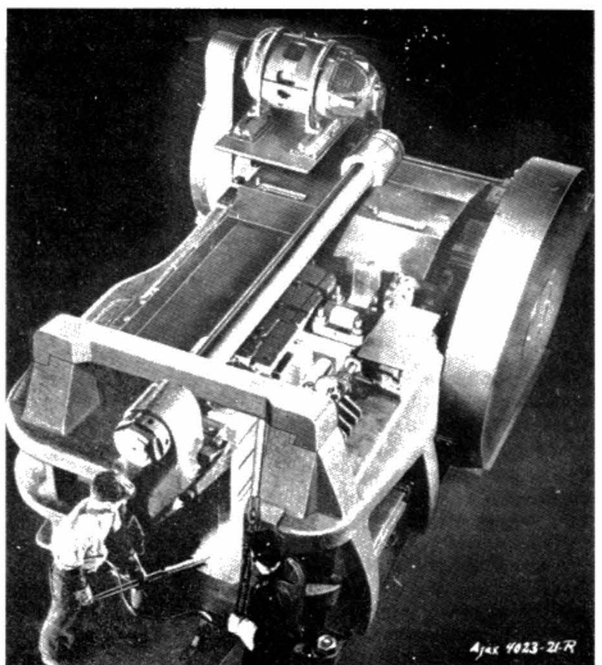
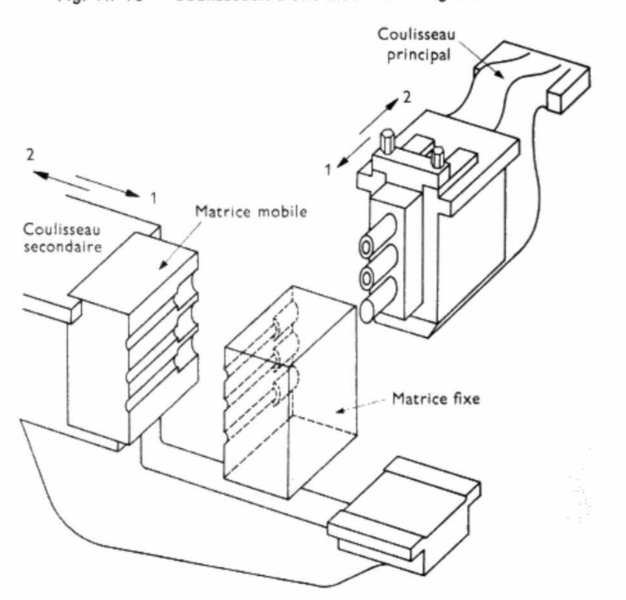


Fig. VII-18 — Coulisseaux d'une machine à forger horizontale



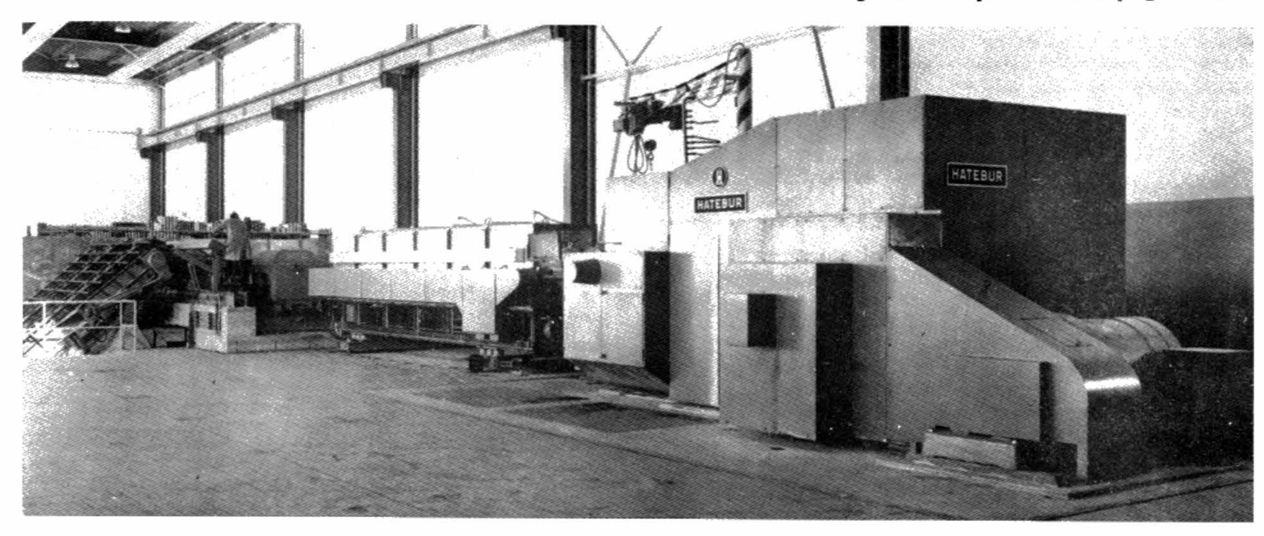


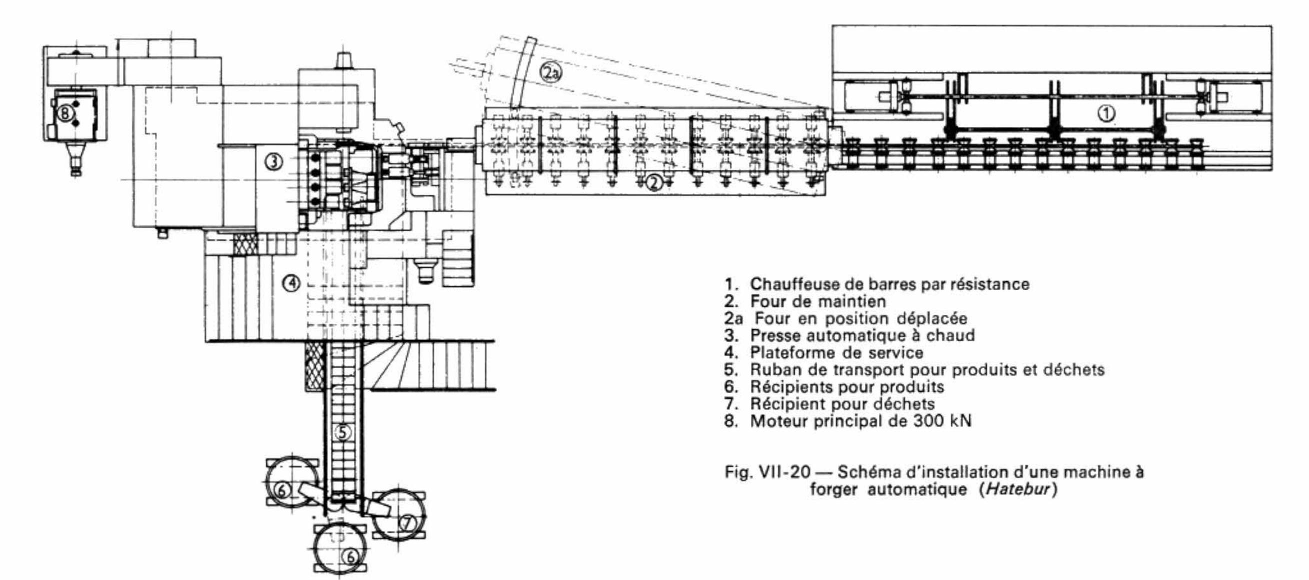
Fig. VII-19 — Machine à forger automatique (*Hatebur*)

Le coulisseau principal est entraîné directement par vilebrequin et bielle. Le coulisseau latéral est mu par un système à genouillère commandé à partir du vilebrequin par une came.

En général, ces machines sont caractérisées par le diamètre maximal de la pièce pouvant être forgée exprimé en pouces (1 pouce = 25,4 mm). On construit ces machines jusqu'à 12 pouces.

mettant de couper un lopin à chaud et deux ou trois postes pour des opérations de formage progressif de la pièce et aussi un poste de perçage.

Les déplacements des pièces d'un poste à l'autre sont assurés par des pinces de transfert mécaniques.; les opérations se faisant simultanément, la machine permet de produire une pièce à chaque révolution. À l'heure actuelle, les performances de ces machines sont de 70 pièces par minute, le diamètre maximal des pièces étant de 120 mm.



1. Chauffeuse de barres par résistance
2. Four de maintien
2a Four en position déplacée
3. Presse automatique à chaud
4. Plateforme de service
5. Ruban de transport pour produits et déchets
6. Récipients pour produits
7. Récipient pour déchets
8. Moteur principal de 300 kN

Fig. VII-20 — Schéma d'installation d'une machine à forger automatique (*Hatebur*)

4° *Machines automatiques* (fig. VII-19 à VII-21). — De plus en plus, pour les fabrications de grandes séries, on utilise des machines automatiques dont le principe est d'estamper en plusieurs opérations, des pièces (en général de révolution) à partir d'une barre préalablement chauffée.

On fabrique ainsi des ébauches de pignons de boîtes de vitesses d'automobiles.

Ces machines comprennent un poste de cisaillage per-

Le chauffage se fait électriquement, soit par passage direct du courant (chauffage par résistance), soit par induction au défilé.

Le travail du métal se fait en matrices fermées (c'est-à-dire sans bavures) et sans dépouilles.

Par rapport à l'estampage ordinaire, ces machines apportent une économie par la haute productivité, par l'absence

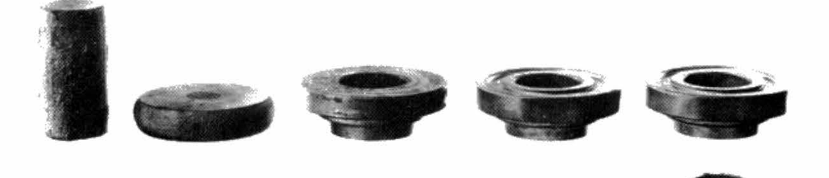


Fig. VII-21

Exemple de fabrication sur machine automatique (*Hatebur*)

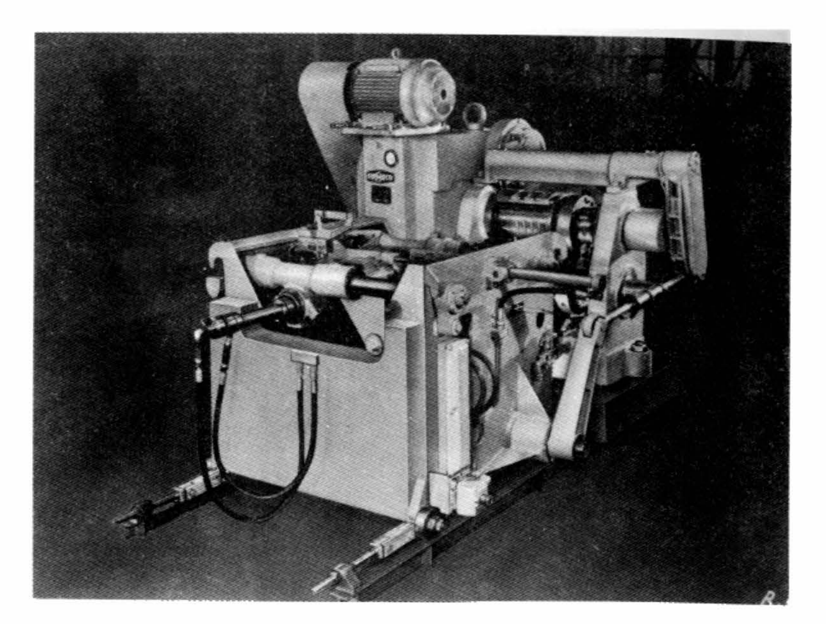


Fig. VII-22

Laminoir ébaucheur avec manipulateur rapide (*EUMUCO*)

de bavures et de dépouilles (ce qui entraîne une moindre consommation de matière) et par la précision des pièces obtenues (les surépaisseurs d'usinage sont réduites). Par conséquent, les frais d'usinage sont plus faibles et des machines, bien que d'un prix élevé, ont une rentabilité très forte. Elles permettent de produire de 15 000 à 20 000 pièces par huit heures.

Leur développement se poursuit vers des fabrications de pièces autres que de révolution telles que croisillons de joints de cardan et chapeaux de bielles.

2.1.4. Machines annexes. — Dans certains cas l'estampeur doit avoir recours à des machines annexes pour préparer les ébauches destinées à l'estampage. Il a également recours à des machines annexes pour des opérations d'ébavurage, de perçage, de pliage ou *maillage*, et de calibrage.

1° *Machines ébaucheuses.* — Lorsque l'on veut réaliser une pièce estampée dont la section n'est pas constante, il faut présenter dans les gravures de forme une ébauche à section évolutive correspondant aux diverses sections de la pièce terminée.

Le choix de la barre se fait en fonction de la plus grande section nécessaire. Ensuite, dans le tronçon de barre utilisable pour la pièce, on opère des réductions de section correspondant aux zones plus minces de la pièce terminée. Ces réductions de section ou *étirage* peuvent être obtenues de plusieurs manières :

— Par martelage : on utilise des marteaux autocompresseurs à frappe rapide (V. t. 3, Forgeage, fig. VI-52). Ce travail exige une grande habileté et ne fournit pas de pièces très constantes. Il n'est appliqué que dans des fabrications de petites séries ne justifiant pas la mise au point d'outillages compliqués.

— Par laminage (fig. VII-22 à VII-24) : les laminoirs ébaucheurs comportent deux cylindres sur lesquels on monte des coquilles gravées de cannelures de forme évolutive. Ces coquilles ne couvrent que la moitié de la circonférence des cylindres. La rotation des cylindres est commandée par l'intermédiaire d'un embrayage à disque et d'un frein pneumatique. À l'arrêt, les demi-coquilles sont en position écartée et il est possible d'engager le lopin à laminer. Lorsque l'on commande l'embrayage, le lopin est laminé et ramené vers l'opérateur. Les coquilles comportent plusieurs cannelures côte à côte qui permettent de réaliser progressivement la forme désirée.

Ces machines peuvent être équipées d'un manipulateur à cycle entièrement automatique et leur cadence de travail permet de les mettre en chaîne avec une presse verticale ou un pilon (V. fig. VII-43).

Fig. VII-23 — Travail au laminoir ébaucheur (*EUMUCO*)

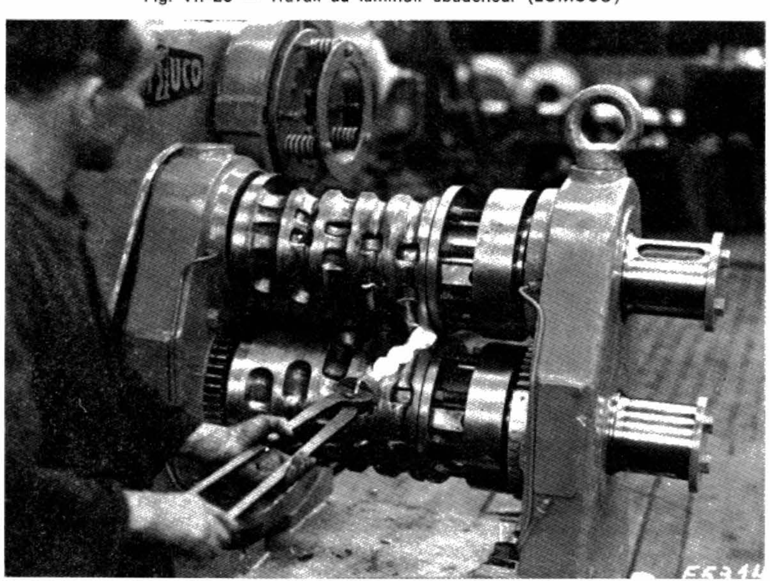
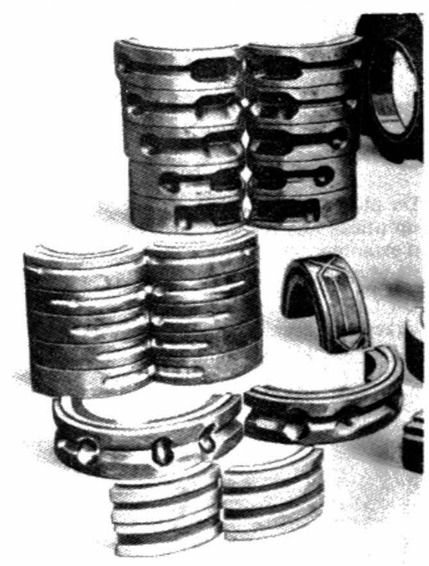


Fig. VII-24 — Coquilles gravées (*EUMUCO*)



2° *Machines d'ébavurage et de perçage.* — L'élimination des bavures est réalisée sur des presses à vilebrequin classiques au moyen d'outillages correspondant aux formes de la pièce et comportant une matrice et un poinçon de découpage.

Le perçage des trous ou *débouchage* se fait par poinçonnage et fréquemment dans des machines combinées d'ébavurage - débouchage (fig. VII-25).

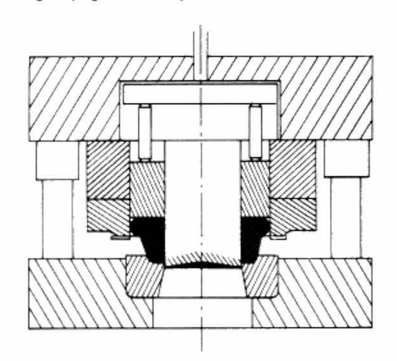


Fig. VII-25
Outillage combiné d'ébavurage et de débouchage

Ces opérations se font le plus souvent à chaud à la sortie des matrices d'estampage. Cependant pour éviter les déformations que peuvent entraîner l'ébavurage et le débouchage, dans certains cas, notamment pour des pièces fragiles, on opère après refroidissement des pièces.

2.2. Outils

2.2.1. Généralités. — La mise en forme du métal par estampage se fait dans des matrices métalliques.

Les matrices de finition représentent, en négatif, les formes définitives de la pièce. Les dimensions des gravures sont celles de la pièce à obtenir augmentées du retrait. En fonction de la complexité de forme de la pièce, on est fréquemment amené à créer des gravures de préparation ou gravures d'ébauche, de formes plus floues et dans lesquelles on s'efforce de faciliter l'écoulement du métal en allongeant les rayons de raccordement des différentes zones de la pièce. Une autre fonction de ces gravures d'ébauche est de supporter l'usure provoquée par l'écoulement du métal et par conséquent, de limiter le plus possible l'usure des matrices de finition. Le nombre des ébauches successives n'est, en fait, limité à un minimum que pour des raisons de prix de fabrication et il y a toujours intérêt à en augmenter le nombre pour améliorer la présentation et la précision des pièces estampées.

Les matrices sont réalisées à partir de blocs d'aciers alliés traités qui doivent présenter de hautes caractéristiques de résistance au choc, (surtout lorsqu'il s'agit de matrices de pilons), une bonne résistance à chaud, car le contact avec le métal chaud ne doit pas provoquer de déformations permanentes, et une bonne résistance à l'usure. L'amortissement des matrices d'estampage représente un handicap certain du fait de leur prix élevé et de leur usure rapide. Il peut atteindre 15 à 20 % du prix de la pièce estampée. Une matrice est en général utilisable pour 5 000 pièces environ.

2.2.2. Présentation. — La composition d'un outillage d'estampage dépend non seulement de la complexité de la pièce mais aussi de la machine qu'il équipe.

S'il s'agit d'un mouton, les matrices sont des blocs parallélépipédiques comportant la seule gravure de finition. Dans ce cas, on présente dans cette gravure une ébauche obtenue sur un pilon autocompresseur ou sur un laminoir. Les matrices sont fixées au marteau et à la chabotte par un clavetage sur queue d'aronde.

Les faces qui forment joint sont taillées au profil du joint. Sur tout le pourtour de la gravure on ménage un sillon appelé logement de bavure (fig. VII-26) qui permet de loger l'excédent de métal.

Les matrices de pilons double effet sont le plus souvent à gravures multiples (fig. VII-27) c'est-à-dire qu'elles comportent sur le côté un *tas d'étirage* permettant d'exécuter les réductions de section par martelage, puis une forme de *roulage* destinée à égaliser les traces de martelage, puis une empreinte ébaucheuse et enfin la gravure de finition.

Les matrices de presses verticales sont des assemblages de blocs élémentaires : matrices de préparation, d'ébauche et de finition, dans des outillages standard appelés porte-matrices. Cette technique permet de régler indépendamment les différentes opérations.

Les divers éléments d'outillage sont fixés dans les porte-matrices par brides ou crapauds.

2.2.3. Fabrication des outillages. — Les blocs à matrices peuvent être usinés à l'état recuit puis traités après usinage, ou bien usinés à l'état trempé et revenu. Bien que le premier procédé simplifie considérablement les problèmes d'usinage, au traitement thermique on risque de créer des déformations qui sont souvent incompatibles avec les tolérances des pièces et qui posent des problèmes au montage des outillages sur machine.

On préfère souvent usiner dans des blocs traités et cela est en particulier le cas pour les matrices de pilons. Ainsi lorsque, après une campagne de forgeage, les gravures sont usées, on procède à un *lavage*, c'est-à-dire qu'après avoir éliminé une épaisseur convenable de matière par rabotage du joint, on creuse une nouvelle gravure. Cette opération se conçoit mieux si l'on usine à l'état traité car on évite de recuire avant lavage et de retraiter ensuite. Pour les matrices de presses, les différents éléments ne sont utilisés que pour une seule campagne de forgeage. On usine à l'état recuit en choisissant des aciers peu déformables au traitement et en faisant éventuellement une reprise d'usinage après traitement.

Les moyens d'usinage mis en œuvre pour la fabrication des outillages sont, d'une part, les moyens conventionnels de tournage, rabotage, perçage et fraisage et, d'autre part, l'électro-érosion et l'électrochimie.

Dans la première catégorie, le fraisage occupe une place prépondérante car c'est le seul moyen d'usinage « classique » utilisable pour réaliser des gravures de formes non circulaires. L'adaptation d'appareils à reproduire à partir de gabarits ou de modèles a rendu possible l'exécution automatique des formes les plus complexes. On utilise également la technique de la commande numérique dans la fabrication des matrices de révolution.

L'usinage par électro-érosion est réalisé en faisant jaillir des étincelles entre une électrode de forme (en cuivre ou en graphite) et la pièce à usiner, le tout étant immergé dans un milieu constitué par un liquide diélectrique ; ces étincelles produisent de petits cratères et permettent l'usinage. Les électrodes sont taillées à la forme de la pièce à obtenir. Leur dimensionnement doit tenir compte du retrait (la gravure

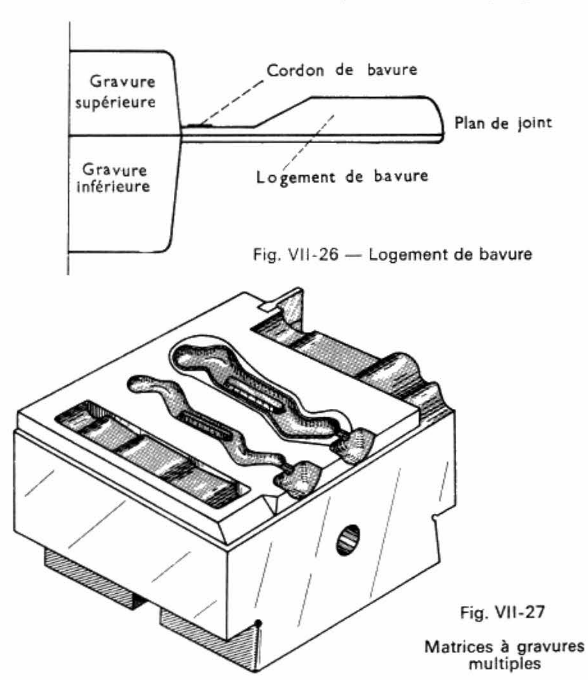


Fig. VII-26 — Logement de bavure

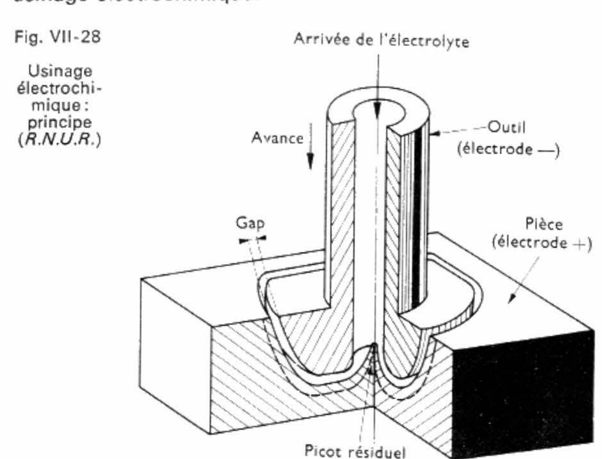
Fig. VII-27
Matrices à gravures multiples

étant faite aux cotes *à chaud*) et de l'intervalle électrode — pièce (on lui donne le nom anglais de « gap ») dans lequel se développeront les étincelles.

L'usinage électrochimique est une application de l'électrolyse. Comme dans l'électro-érosion, on utilise une électrode à la forme des pièces à obtenir au gap et au retrait près, et on fait passer un courant électrique continu entre l'électrode et la pièce. On injecte entre l'électrode et la pièce un électrolyte sous forme de solution de chlorure ou de nitrate de sodium. L'électrode est reliée au pôle négatif (cathode) et la matrice au pôle positif (anode) (fig. VII-28). Il se produit une dissolution anodique du métal de la matrice ; il précipite sous forme d'hydroxydes qui sont entraînés par le courant d'électrolyte. Si en électro-érosion on constate une usure de l'électrode il n'y en a absolument aucune en usinage électrochimique.

Fig. VII-28

Usinage électrochimique : principe (*R.N.U.R.*)



Ces procédés sont appliqués industriellement bien que nécessitant des investissements et un potentiel technique spécialisé importants (fig. VII-29). Leur gros avantage se trouve dans les temps d'usinage : une heure de travail en électrochimie remplace huit heures d'électro-érosion, et près de cinquante heures d'usinage classique.

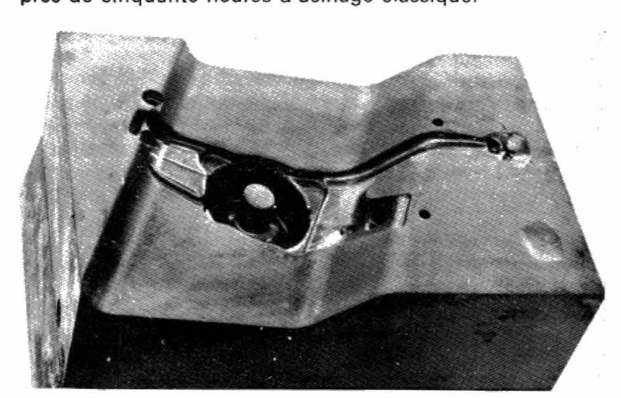
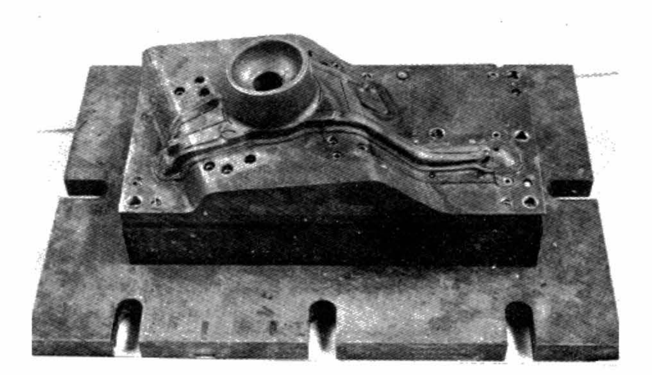


Fig. VII-29 — Ci-dessus, matrice de porte-fusée exécutée par électrochimie ; ci-après, électrode correspondante (*R.N.U.R.*)



D'autres procédés peuvent être utilisés avec succès, tels que l'enfonçage à froid qui consiste à imprimer la gravure à l'aide d'un poinçon. Cette opération se fait sur des presses hydrauliques très lentes dont la vitesse est voisine du millimètre par minute. On est vite arrêté par le problème posé par la résistance des poinçons.

La fabrication des matrices par moulage de précision s'est également beaucoup développée. On obtient de très bons résultats sur des matrices massives. On utilise le procédé de moulage en carapace ; le traitement thermique semble avoir une influence primordiale sur la réussite de cette méthode dont l'application reste très délicate surtout sur le plan des caractéristiques mécaniques du métal moulé. Les matrices moulées ont fréquemment une longévité plus grande que les matrices usinées dans un bloc forgé. La raison de cette plus grande résistance à l'usure pourrait être la concentration plus grande des éléments d'alliage en surface, mais cette hypothèse n'est pas toujours admise.

Il est assez courant de procéder à des traitements superficiels des matrices ; pour augmenter leur durée on applique le chromage dur et la nitruration.

Dans le même ordre d'idées, on peut prolonger la vie des matrices par réparations locales en les rechargeant par soudure d'alliages durs.

2.3. Les moyens de chauffage.

— Pour amener le métal à la température la plus favorable à l'estampage, on utilise deux techniques qui sont la combustion de fluides liquides ou gazeux et l'énergie électrique.

2.3.1. Fours à flammes.

— Dans ces fours, la chaleur est fournie par la combustion de gaz ou de produits pétroliers tels que les fuels. On n'utilise pratiquement plus les combustibles solides. Les combustibles gazeux utilisés sont en particulier les gaz de cokerie ou de hauts fourneaux, le gaz de ville et les gaz naturels. Le combustible liquide le plus répandu est le mazout dans ses différentes présentations, depuis le fuel lourd jusqu'au fuel domestique. Les fuels lourds doivent être chauffés pour atteindre une viscosité permettant de les distribuer et de les pulvériser dans les brûleurs. C'est en fonction des installations générales des usines que l'on choisit une qualité de fuel déterminée.

Les fours à flammes peuvent être répartis en deux catégories :

— Les fours fixes ou dormants (fig. VII-30) : ce sont des chambres en maçonnerie réfractaire munies de brûleurs. S'ils ont l'inconvénient d'entraîner une discontinuité dans le travail, car il y a rupture de débit entre le chargement et le moment où les pièces sont à température, en revanche, ils permettent de chauffer des pièces de toutes formes.

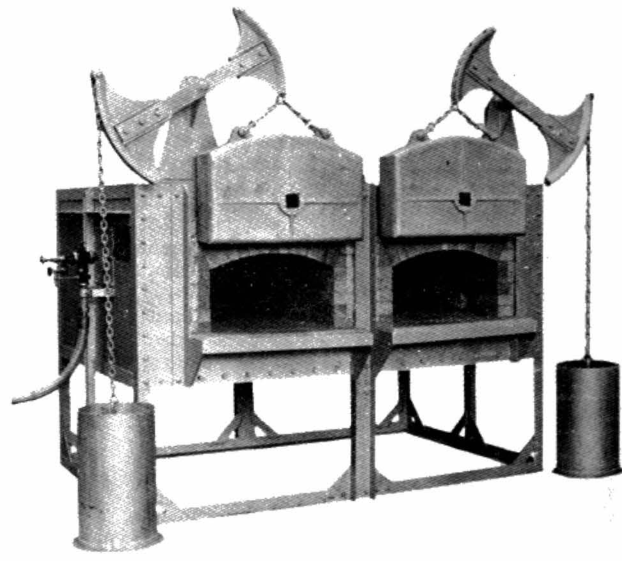


Fig. VII-30 — Four à réchauffer à deux laboratoires avec chauffage aux huiles lourdes (*Stein et Roubaix*)

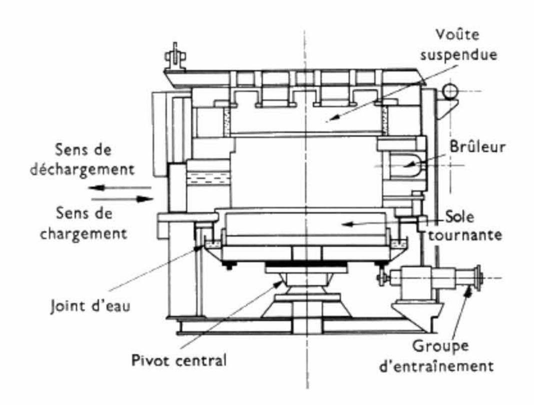


Fig. VII-31 — Four à sole tournante

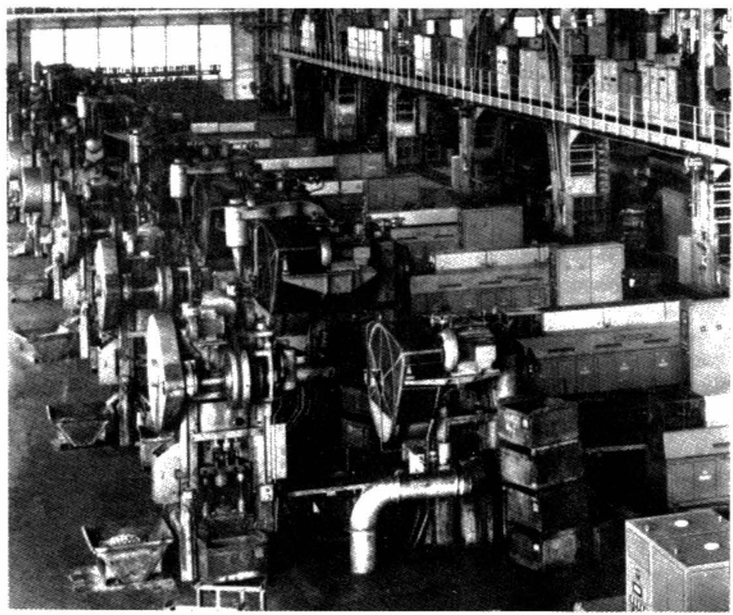


Fig. VII-32 b — Vue partielle d'une forge moderne équipée de 28 chauffeuses par induction pour chauffage global de lopins (*AEG-Elotherm-Peugeot, usine de Mulhouse*)

— Les fours continus poussants ou à sole tournante : ils permettent une production continue et un meilleur rendement thermique. Les fours poussants, dans lesquels on fait progresser les lopins bout à bout, ne peuvent permettre le chauffage d'ébauches de géométrie complexe. On leur préfère actuellement les fours à sole tournante (fig. VII-31) dans lesquels les produits à chauffer sont déposés sur une sole circulaire ; ils progressent dans la chambre de chauffe par rotation de la sole jusqu'au défournement.

Les fours à flammes ont l'inconvénient de soumettre les produits à chauffer à une atmosphère oxydante et décarburante à haute température. De ce fait les estampeurs ont de nombreux problèmes de présentation des pièces, car il est difficile de se débarrasser de la gangue d'oxyde qui recouvre les lopins à la sortie du four et qui se retrouve sur les pièces sous forme d'incrustations de calamine conduisant à des rebuts.

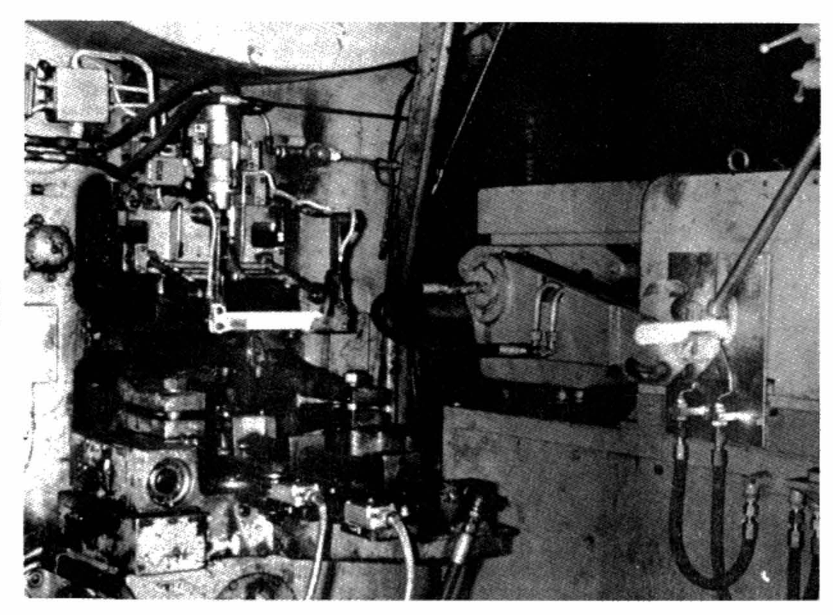
2.3.2. Chauffage électrique. — Dans les ateliers modernes, on installe de plus en plus fréquemment des moyens de chauffage électrique. Les plus répandus sont les chauffeuses par induction moyenne fréquence (fig. VII-32 a et b). Ces chauffeuses sont constituées principalement par un inducteur, c'est-à-dire une bobine parcourue par un courant de moyenne fréquence : 1 000 à 5 000 hertz. Les lopins sont introduits dans l'axe de cette bobine et sont chauffés par l'effet Joule dû aux courants induits dans la pièce.

Les temps de chauffage sont très réduits par rapport aux fours à flammes et la rapidité du chauffage permet d'éviter la formation de calamine, du moins en quantité gênante. On trouve sur le marché des chauffeuses répondant à tous les problèmes de chauffage, total ou partiel, des lopins (le chauffage partiel est nécessaire, par exemple, pour le refoulement en bout de barres sur machines à forger).

L'inconvénient du chauffage par induction réside en ce qu'il nécessite des investissements plus élevés que les fours à flammes. En effet, en plus des chauffeuses proprement dites il faut installer les alternateurs qui fournissent le courant à la fréquence souhaitée ; ce sont soit des groupes tournants moteur-alternateur, soit des groupes statiques à thyristors.

Le choix de la fréquence du courant est déterminé par la section de matière à chauffer et les inducteurs sont calculés en fonction du diamètre des lopins et du débit horaire. Lorsque l'on a à chauffer des sections différentes de métal, il faut prévoir le changement des inducteurs. Malgré ses

Fig. VII-32 a — Chauffeuse par induction ; détail montrant l'éjection d'un lopin chauffé et un lopin dans une pince de transfert ouverte ; cadence : 370 kg/h (*AEG—Elotherm*)



contraintes le chauffage par induction apporte de nombreux avantages qui permettent de rentabiliser les investissements :

— Économie de matières résultant d'une moindre perte par oxydation au feu. Cette économie est d'environ 1,5 %.

— Débit régulier de métal chaud permettant une cadence précise dans l'alimentation des machines et une mécanisation éventuelle.

— Gain de surface dans l'atelier car une chauffeuse est environ cinq fois moins encombrante qu'un four à flammes.

— Meilleure ambiance de travail.

— Économies sur les frais d'entretien des produits réfractaires.

— Élimination de l'inertie calorifique. Dans un four à flammes il faut prévoir une période de mise en température de plusieurs heures, et en cas d'arrêt de production il faut maintenir le four à température. Avec le chauffage par induction, la mise en température est instantanée.

Le chauffage par résistance obtenu par passage direct de courant dans la pièce n'est guère utilisé que dans les installations de machines automatiques où l'on chauffe des barres entières de 6 à 8 m de longueur. Il n'est pas applicable au chauffage de lopins. En chauffage de barres, bien que son rendement énergétique soit meilleur que celui du chauffage par induction, les consommations d'énergie étant de 350 kWh par tonne contre 500 pour l'induction, il n'est intéressant que si le débit de métal chaud est supérieur à 5 t/h.

2.4. Groupe de production. — La disposition la plus courante que l'on rencontre dans les ateliers d'estampage modernes est constituée par un four à sole tournante ou un four à induction, par un ou plusieurs laminoirs ébaucheurs qui alimentent une presse verticale et, en aval de celle-ci, par une presse à ébavurer et éventuellement une presse à calibrer. Cette disposition est reproduite sur la figure VII-33. Les figures VII-34 et VII-35 montrent les produits aux différentes phases de fabrication.

Dans certains ateliers on trouve des lignes plus complètes comprenant les installations de traitements thermiques et de parachèvement. Cependant, dans le cas général, il est difficile d'enchaîner l'estampage et le traitement thermique car les temps d'arrêt pour changement d'outillages ou réglages sur les presses ainsi que les risques de panne ne sont pas du même ordre de grandeur en estampage et en traitement thermique ; cela conduit à installer des fours de traitement surpuissants et mal utilisés.

2.5. Le traitement thermique. — Il est presque toujours nécessaire de faire subir un traitement thermique aux pièces estampées, soit pour obtenir une usinabilité meilleure, et dans ce cas on opère un recuit de normalisation ou un recuit conduisant à une structure de la matière plus favorable à l'usinage, soit pour donner aux pièces les caractéristiques mécaniques définitives en pratiquant une trempe suivie d'un revenu.

Ces opérations se font dans des fours poussants continus (fig. VII-36), les pièces étant chargées dans des plateaux

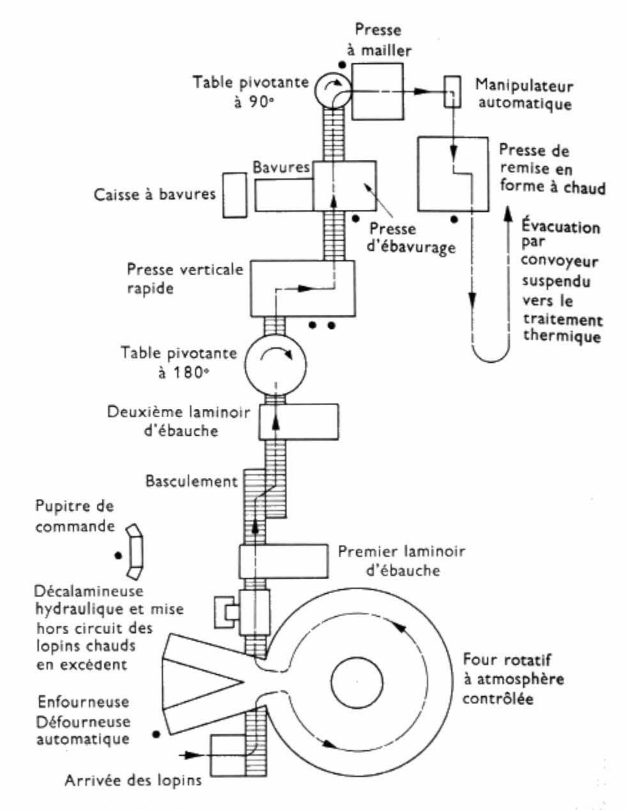


Fig. VII-33 — Disposition d'un ensemble d'estampage

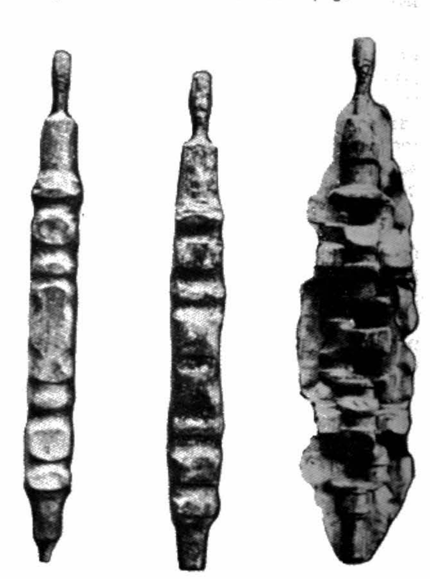


Fig. VII-34 — Vilebrequin de moteur à trois stades de fabrication



Fig. VII-35 — Séquence de fabrication d'un porte-fusée : 1. Lopin ; 2, 3, 4, 5. Laminage ; 6. Cambrage ; 7. Ébauche ; 8. Finition ; 9. Pièce terminée ; 10. Bavure (*R.N.U.R.*)

ou dans des dispositifs spéciaux qui réduisent les risques de déformation. Ces fours sont chauffés au gaz ou au mazout et on ne prête pas une attention particulière à l'atmosphère ambiante des fours. En revanche on assure une régulation très stricte des températures.

Dans certains cas, et plus particulièrement pour les ébauches de pignons destinés à être brochés et taillés, on effectue un recuit isotherme en bain de sels ; cela permet d'obtenir des structures (perlite et ferrite) particulièrement favorables à ces opérations d'usinage.

2.6. Parachèvement. — Les pièces estampées sont soumises à un certain nombre de contraintes de présentation définies par le client et qui nécessitent des opérations de parachèvement répondant à des problèmes d'aspect, de géométrie et de conformité.

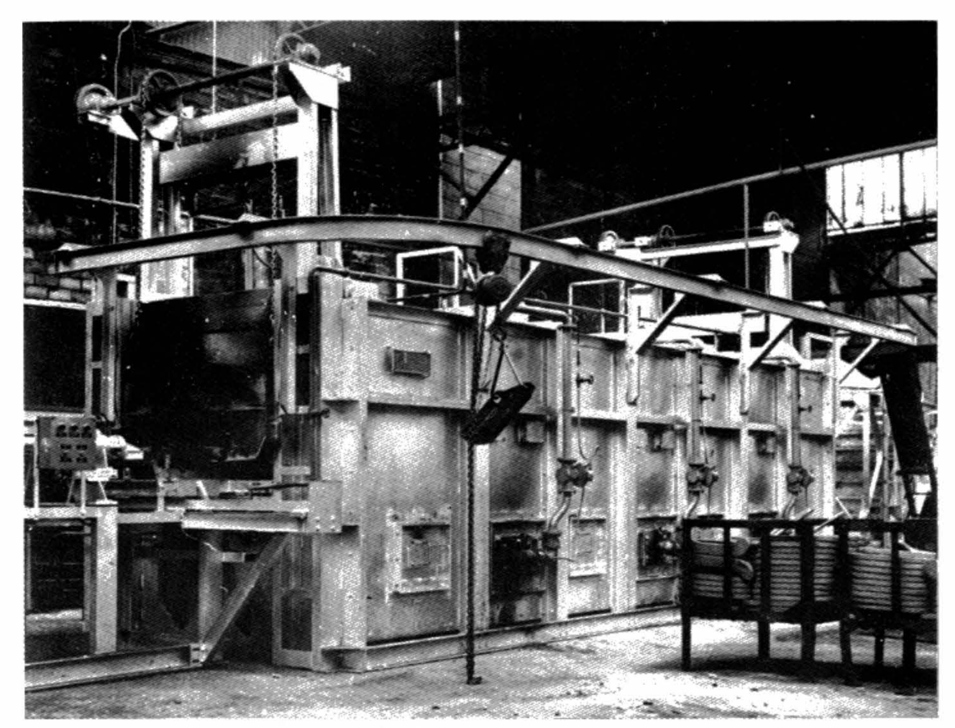


Fig. VII-36

Four de trempe à plateaux; température réglable entre 800 et 900 °C; production: 600 kg/h (*Fours industriels C.F.I.*)

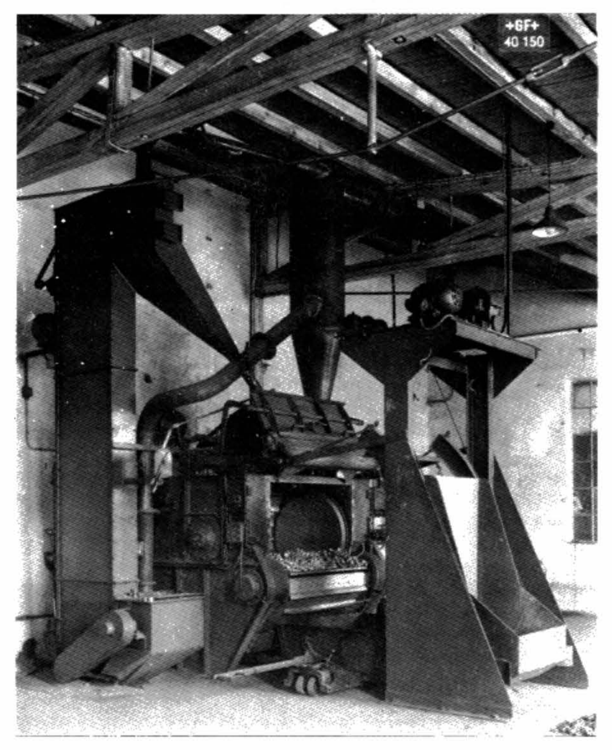


Fig. VII-37 — Machine à grenailler (*Stokvis*)

2.6.1. Aspect. — Les pièces estampées, qu'elles soient brutes de forge ou qu'elles aient subi un traitement thermique, sont recouvertes d'une pellicule d'oxyde. Cet oxyde est indésirable dans les opérations d'usinage parce qu'il provoque une usure prématurée des outils coupants et pollue les huiles de coupe. Par ailleurs, il faut l'éliminer dans les parties de pièces non usinées devant recevoir une peinture.

On se débarrasse de cette pellicule d'oxyde par des moyens mécaniques: sablage ou grenaillage ou par roulage au tonneau en présence d'abrasifs.

Le sablage ou le grenaillage (fig. VII-37) consistent en des projections de sable ou de grenaille métallique sur la surface des pièces. L'impact des grains provoque l'éclatement de la pellicule d'oxyde et met le métal à nu.

Ces opérations confèrent aux pièces estampées une surface plus ou moins rugueuse selon la granulométrie du sable ou de la grenaille.

On peut également nettoyer les pièces par dissolution des oxydes dans des bains d'acide sulfurique ou chlorhydrique. Par ailleurs, les pièces ébavurées à chaud peuvent présenter un reliquat de bavure qu'il faut éliminer par ébarbage à la meule.

2.6.2. Géométrie. — Il y a là deux aspects à considérer. Le premier se rapporte à la géométrie générale de la pièce. À la sortie de l'estampage, les pièces chaudes et fragiles sont jetées dans des bennes de manutention. Leur chute dans ces bennes peut produire des déformations. Au traitement thermique, les pièces se déforment par libération des contraintes de forgeage et création de contraintes de trempe.

Pour que leurs formes soient conformes au plan de pièce donné par le client, on est amené à procéder à un *redressage*. Cette opération est faite sur des petites presses mécaniques ou hydrauliques.

Le second aspect est celui des tolérances dimensionnelles. L'estampage à chaud, malgré toutes les précautions prises, ne permet pas l'obtention de cotes précises. Les tolérances des pièces estampées à chaud sont régies par la norme Euronorm E 02-500. Elles varient en fonction de la masse de la pièce, de sa difficulté de réalisation, et de la composition de l'acier. À titre d'exemple, pour une pièce de 4 kg de difficulté moyenne, en acier au carbone demi-dur, les tolérances normales sont de 2 mm sur les dimensions de 0 à 32 mm et peuvent atteindre 4 mm sur les dimensions de 600 à 1 000 mm.

Des tolérances plus réduites, évitant tout usinage ultérieur peuvent être respectées par un *calibrage à froid*. Cette opération permet d'obtenir des cotes avec des tolérances de quelques dixièmes de millimètre et de bons états de surface. Elle se fait sur presses hydrauliques (fig. VII-38) ou mécaniques et n'intéresse que des zones bien délimitées des pièces.

2.6.3. Contrôle de conformité. — Il s'exerce sur la géométrie, les caractéristiques mécaniques et sur la santé des pièces.

1° *Géométrie:* le contrôle géométrique des pièces estampées se fait à l'aide de calibres et de montages de présentation. Il sert à vérifier que les pièces sont bien *venues,*

Fig. VII-38 — Presse de calibrage à froid
(*E.W. Bliss — Chevojon*)

c'est-à-dire qu'il n'y a pas de manque de matière provenant d'un mauvais remplissage des gravures d'estampage, qu'elles sont *en rapport*, c'est-à-dire qu'il n'y a pas désaxage de part et d'autre du joint de matrice provenant d'un mauvais réglage des outillages, et que la géométrie générale est respectée (entraxe de bossages, dénivellations). Par ailleurs, ce contrôle permet de vérifier que les cotes sont dans les tolérances demandées et que la pièce peut être usinée sans qu'il subsiste de traces de brut ou « *traces de feu* ».

2° *Caractéristiques mécaniques :* il faut contrôler que la matière est bien de la qualité demandée. Pour cela, on a recours aux appareils magnétoscopiques ou à des procédés tels que le contrôle par étincelage. En effet, il est possible de définir la composition chimique d'un acier en examinant la forme des étincelles produites par une meule.

Par billage on s'assure que la dureté de la pièce est conforme à la demande.

3° *Santé :* les pièces estampées peuvent présenter des défauts provenant de la matière première utilisée : criques, lignes, etc. ou de l'estampage lui-même : replis tapures, etc.

Ces défauts ne peuvent pas toujours être décelés par un examen visuel attentif, et on les met en évidence par attaque à l'acide ou par fluorescence. Dans ce dernier procédé les pièces sont immergées dans un liquide fluorescent qui est fixé par les défauts de surfaces. Ceux-ci sont ensuite mis en évidence par un examen en lumière noire (fig. VII-39).

3. ÉVOLUTIONS DE L'ESTAMPAGE

3.1. Buts poursuivis. — Comme dans tous les domaines, le but final de l'évolution de l'estampage est la réduction du coût des pièces fabriquées. Les actions sont engagées non seulement dans l'atelier d'estampage mais également en amont et en aval et les résultats doivent être jugés non pas au niveau du prix de la pièce estampée, mais à celui de la pièce prête à l'utilisation.

Le moteur de cette évolution est la compétition entre l'estampage et les techniques concurrentes de mise en forme du métal, la plus active dans ce domaine étant la fonderie.

3.2. Évolution en amont. — La matière première utilisée en estampage est la barre laminée ou forgée. Par rapport aux fondeurs qui utilisent des riblons ou des métaux n'ayant pas subi de transformation, les estampeurs utilisent une matière chère.

Le premier développement consiste à estamper des ébauches obtenues par moulage. Cette technique est appliquée avec succès dans le procédé Autoforge pour les pièces en métaux non ferreux. Des problèmes d'outillages restent à résoudre en ce qui concerne les aciers.

La machine Autoforge comporte quatre postes de travail disposés autour d'un axe et desservis par un plateau tournant qui assure le transfert d'un poste à l'autre. Le premier poste est constitué par un moule métallique dans lequel on verse le métal liquide pour former une ébauche. Ce moule, refroidi à l'eau, permet une solidification rapide du métal. L'ébauche est ensuite transportée au second poste pour y être estampée sur une presse hydraulique. Au troisième poste de travail, on effectue le découpage de la bavure, et le quatrième est un poste d'évacuation de la bavure. La capacité de cette machine est limitée par celle de la presse hydraulique de forgeage à 2 000 kN. Elle peut produire 360 pièces ou chapelets de pièces par heure. L'économie, par rapport au prix des pièces obtenues par la méthode classique, est de 35 % environ.

Dans le même esprit, il existe aux États-Unis d'Amérique une installation pour la fabrication de fusées d'automobiles par estampage d'ébauches en acier moulé. Elle reproduit le même procédé à une échelle plus grande.

Le second développement consiste à fabriquer des barres d'acier par coulée continue. Ces barres qui ne subissent plus d'opérations de laminage sont d'un prix sensiblement moins élevé et peuvent être utilisées en estampage de la même façon que les barres laminées.

Toujours en amont, il existe un procédé mis au point en U.R.S.S. et étudié également aux États-Unis d'Amérique qui consiste à forger le métal à l'état liquide. Autrement dit, le métal coulé dans une matrice est pressé à l'état liquide par un poinçon et est solidifié sous pression. Ce procédé n'a pas encore connu d'applications industrielles à ce jour.

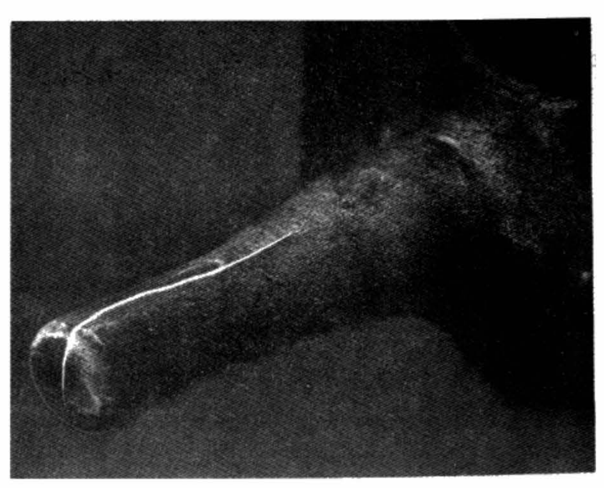


Fig. VII-39 — Mise en évidence d'un défaut par fluorescence
(*ADETIEF*)

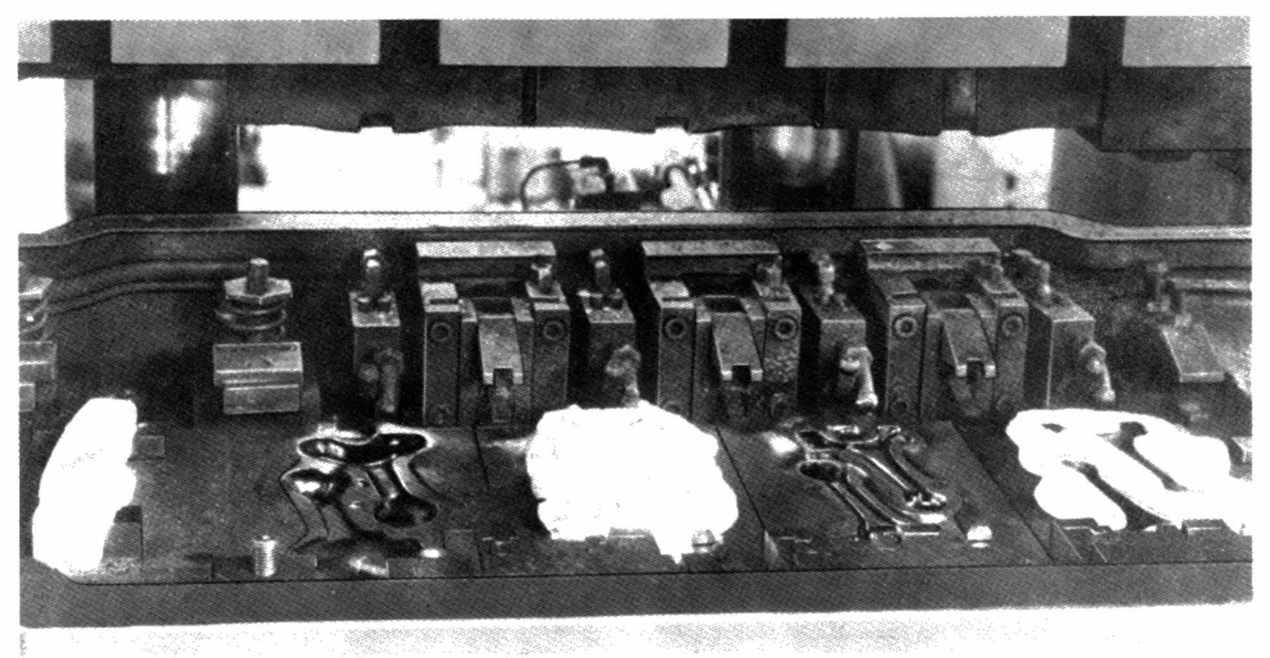


Fig. VII-40 — Estampage automatique sous presse (*EUMUCO*)

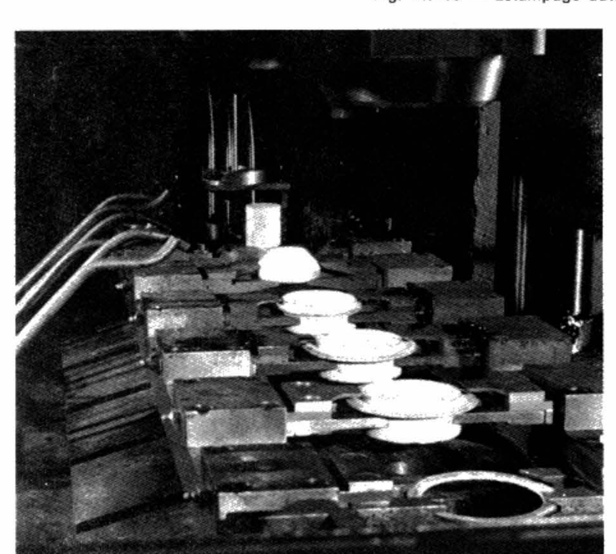


Fig. VII-41 — Forgeage d'ébauche de pignon sur presse automatique de 16 000 kN (*National Machinery Co — J.G. Kayser*)

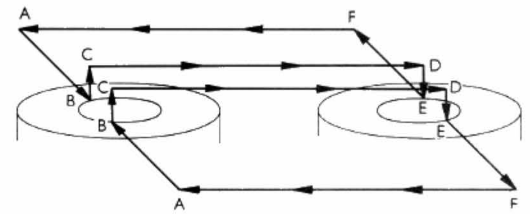


Fig. VII-42 — Schéma de mouvement des pinces de transfert automatique

3.3. Évolution des ateliers d'estampage. — Dans les ateliers d'estampage, l'action est principalement orientée vers la réduction des frais de main-d'œuvre et vers une meilleure utilisation de la matière. La productivité d'un chantier d'estampage peut être accrue par le perfectionnement des moyens de manutention et par la mécanisation des machines.

Dans le domaine du travail sur presses de gros progrès ont été faits vers l'automatisme et les constructeurs présentent des presses équipées de transferts (fig. VII-40 et VII-41) qui assurent le déplacement des pièces d'une opération à l'autre au moyen de pinces mécaniques dont les mouvements (fig. VII-42) sont synchronisés avec celui des coulisseaux de la presse. Ces équipements existent également sur machines à forger horizontales et sur laminoirs ébaucheurs (fig. VII-43). Dans le domaine de la manutention, on utilise fréquemment, pour relier les fours aux machines et les machines entre elles, des transporteurs à chaînes métalliques. Les liaisons entre l'estampage et les traitements thermiques sont parfois réalisées par convoyeurs aériens; en outre cela permet d'éviter les chocs de manutention et tout en assurant un refroidissement convenable des pièces.

On assiste également à l'apparition des robots pour assurer la présentation des pièces dans les matrices et pour

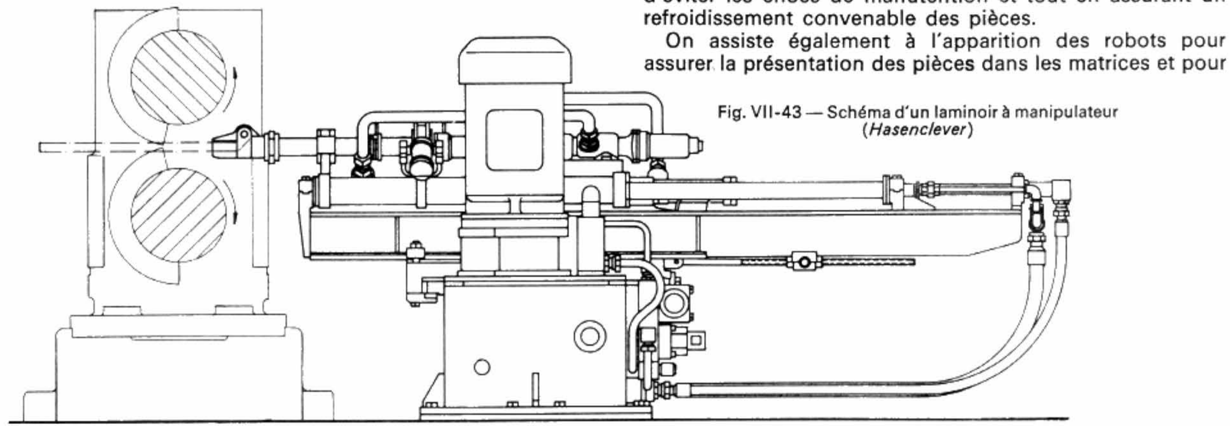


Fig. VII-43 — Schéma d'un laminoir à manipulateur (*Hasenclever*)

les évacuer. Le fonctionnement de ces appareils dépend de circuits hydrauliques commandés électroniquement par un enregistrement magnétique. Après avoir exécuté un cycle de mouvements par commande manuelle, cela en enregistrant les différentes données du cycle, on peut, à l'aide de ces robots, répéter indéfiniment les mouvements. Leur application se conçoit à des postes dont le travail est répétitif, ce qui est fréquent en estampage (fig. VII-44).

Sur le plan des économies de matière, on évite beaucoup de pertes en utilisant des barres de plus en plus longues pour réduire les chutes au tronçonnage des lopins. La tendance actuelle est à la mise en œuvre de barres de 8 m. On surveille également de très près la tolérance de masse des lopins en effectuant un contrôle statistique des masses ; dans cet ordre d'idée, il existe sur le marché des cisailles à régulation automatique des masses. La masse des lopins est fonction de la longueur que l'on sait régler avec une bonne précision (en amenant la barre sur une butée) et du diamètre des barres soumises aux tolérances des laminés. La régulation automatique de la masse consiste à relier la commande de réglage de la butée à un organe de mesure de la masse linéique de chaque barre. Une mémoire permet d'enregistrer la longueur de la barre et de prédéterminer le nombre de lopins qui seront produits dans la barre engagée avant que les données de réglage n'entrent en jeu pour la barre suivante. L'amélioration de la précision de l'estampage, (précision des machines elles-mêmes, précision d'exécution des outillages, aciers d'outillages plus résistants, meilleure régularité et propreté du chauffage), permet de serrer de plus près les dimensions des pièces terminées en réduisant les surépaisseurs d'usinage.

L'existence d'éjecteurs sur les presses d'estampage permet de réduire considérablement, voire de supprimer, les dépouilles. Une meilleure répartition des sections facilitée par l'ébauchage au laminoir amène une réduction

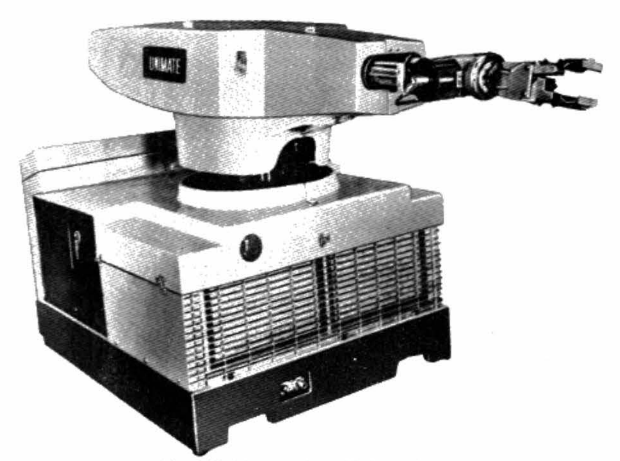


Fig. VII-44 — Robot (*GKN-Unimate*)

des bavures. Toutes ces lignes d'action conduisent à une réduction de la quantité de matière mise en œuvre pour exécuter une pièce.

3.4. Évolutions en aval. — L'usinage des pièces estampées est une opération coûteuse, et un travail des estampeurs consiste à obtenir des pièces nécessitant moins ou pas d'usinage. Il ne résulte pas toujours de ces efforts un produit moins cher mais le profit de ce travail doit être jugé sur la somme des prix de l'estampage et de l'usinage.

Si l'on se penche sur les tableaux de tolérances des pièces estampées, on voit qu'elles n'ont aucun rapport avec celles des pièces usinées. Pour s'en rapprocher, l'évolution de l'estampage peut utiliser plusieurs moyens.

Pièces exécutées sur marteaux-pilons, sur presses et sur machines horizontales à forger - Tolérances sur longueurs, largeurs, hauteurs, déport, saillies résiduelles de bavure et plats d'ébavurage*

(* diamètres et longueurs des pièces exécutées sur machines horizontales à forger)

Nota : Dimension entre un axe et une face, cote partielle d'un côté du joint + 1/3 — 1/3 de la tolérance totale.
Dimension intérieure : inverser les signes + et —.

Déport	Saillie res. bav. (+) Plat d'ébav. (−)	Joint : Asymétrique / Plan ou symétrique	Masse (kilogrammes) de — à — (inclus)	Coefficient de difficulté matière M1 M2	Difficul. forme S1 > 0.63, S2 0.32 < ≤ 0.63, S3 0.16 < ≤ 0.32, S4 ≤ 0.16	0 – 32	32 – 100	100 – 160	160 – 250	250 – 400	400 – 630	630 – 1000	1000 – 1600	1600 – 2500
0.4	0.5		0-0.4			$1.1^{+0.7}_{-0.4}$	$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2^{+1.3}_{-0.7}$			
0.5	0.6		0.4-1.0			$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$			
0.6	0.7		1.0-1.8			$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$		
0.7	0.8		1.8-3.2			$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	
0.8	1		3.2-5.6			$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$
1	1.2		5.6-10			$2^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$
1.2	1.4		10-20			$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$
1.4	1.7		20-50			$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$
1.7	2		50-120			$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$
2	2.4		120-250			$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$	$8^{+5.3}_{-2.7}$
2.4	2.8					$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$	$8^{+5.3}_{-2.7}$	9^{+6}_{-3}
						$4^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$	$8^{+5.3}_{-2.7}$	9^{+6}_{-3}	$10^{+6.7}_{-3.3}$
						$4.5^{+3}_{-1.5}$	$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$	$8^{+5.3}_{-2.7}$	9^{+6}_{-3}	$10^{+6.7}_{-3.3}$	$11^{+7.3}_{-3.7}$
						$5^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$	$8^{+5.3}_{-2.7}$	9^{+6}_{-3}	$10^{+6.7}_{-3.3}$	$11^{+7.3}_{-3.7}$	12^{+8}_{-4}
						$5.6^{+3.7}_{-1.9}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7^{+4.7}_{-2.3}$	$8^{+5.3}_{-2.7}$	9^{+6}_{-3}	$10^{+6.7}_{-3.3}$	$11^{+7.3}_{-3.7}$	12^{+8}_{-4}	$14^{+9.3}_{-4.7}$

(Dimensions : de — à — (inclus) millimètres)

QUALITÉ F (NORMALE)

3.4.1. Le calibrage à froid. — Sans augmenter la précision générale des pièces estampées, il est aisé d'obtenir localement des cotes précises par calibrage à froid et par là d'économiser une opération d'usinage. C'est, par exemple, le cas sur les bielles de moteurs à explosion où les faces du pied et de la tête sont mises à épaisseur par calibrage à froid. On évite ainsi une mise à épaisseur par fraisage. Cette méthode est très utilisée dans les fabrications de grandes séries pour l'automobile par exemple.

3.4.2. Le forgeage à froid. — On assiste à un développement du forgeage à froid remplaçant le forgeage à chaud pour des fabrications de pièces de révolution ou au moins symétriques.

L'application ne se limite plus à de petites pièces telles que vis et boulons mais on trouve des presses hydrauliques rapides et des presses mécaniques automatisées dont la capacité va de 6 000 à 45 000 kN (fig. VII-45 et VII-46), qui permettent de produire des pièces de plusieurs kilogrammes à des cadences atteignant trente pièces par minute (fig. VII-47 et VII-48).

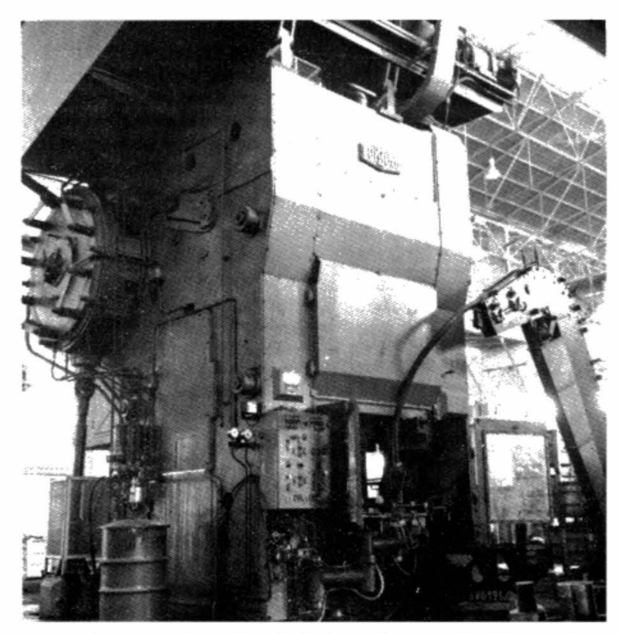


Fig. VII-45 — Presse à coin de 25 000 kN pour forgeage à froid automatique (*R.N.U.R.*)

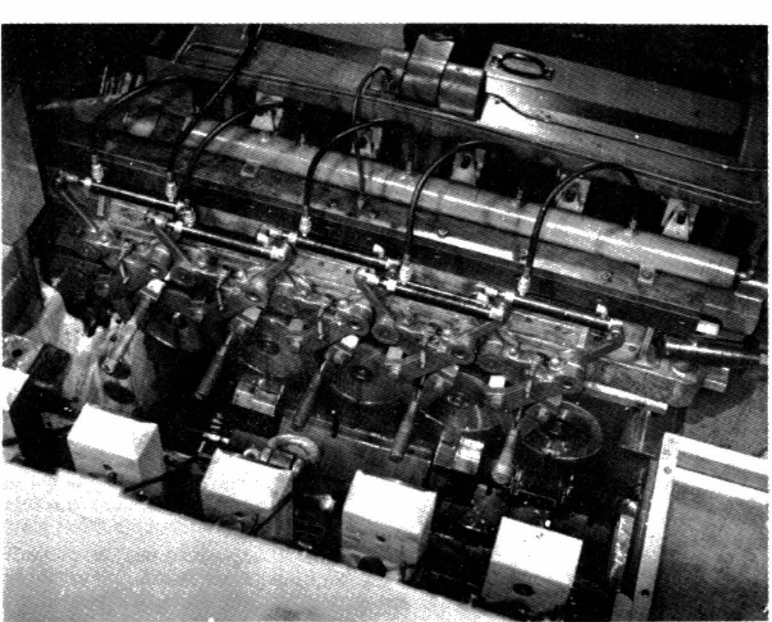


Fig. VII-46 — Forgeage de pignons d'attaque à froid (*National Machinery Co. — J.G. Kayser*)

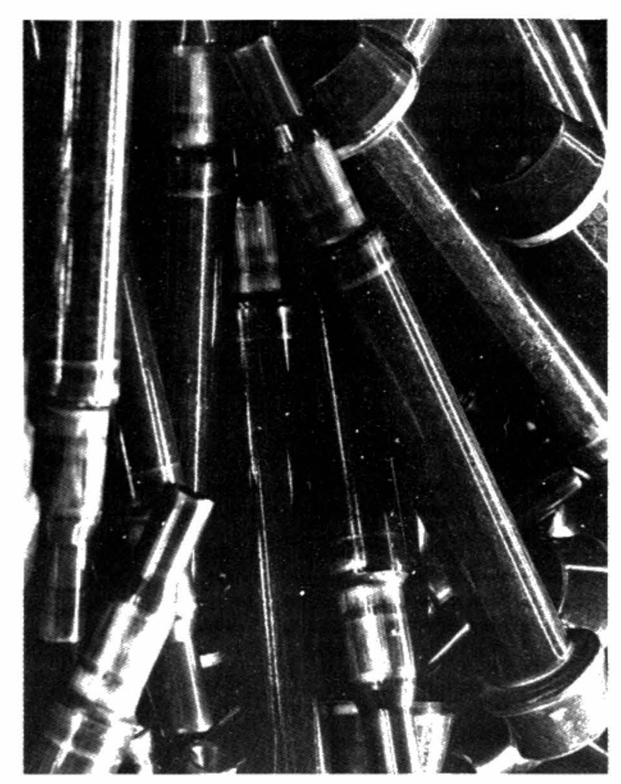


Fig. VII-47 — Pignons forgés à froid (*R.N.U.R.*)

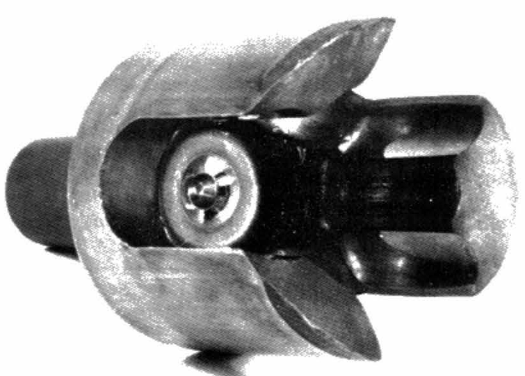


Fig. VII-48 — Pièce de transmission forgée à froid (*R.N.U.R.*)

Ce procédé permet d'économiser environ 30 % sur la quantité de matière mise en œuvre et plus de 50 % sur la perte de métal à l'usinage par rapport au travail habituel à chaud. Il nécessite un certain nombre de précautions dans la préparation des lopins qui doivent être recuits et dont la surface doit être lubrifiée par phosphatation et savonnage, opération dite *bondérisation*. Au cours du travail à froid, le métal s'écrouit et devient fragile. Lorsque la fabrication d'une pièce correspond à un taux de déformation trop important, il est nécessaire, pour éviter la formation de cassures de fatigue, de procéder en plusieurs étapes et d'effectuer des recuits intermédiaires pour supprimer l'écrouissage. Ces recuits sont d'autant plus fréquents que la teneur en carbone est élevée.

Étant soumis à de très grandes contraintes, les outillages doivent être très durs (dureté Rockwell : 55) et soigneusement frettés. Les traitements thermiques sur pièces forgées à froid doivent être effectués sous atmosphère protectrice pour ne pas détériorer les qualités de surface obtenues par travail à froid. Le degré de précision atteint en forgeage à froid rejoint celui des opérations d'ébauche d'usinage et dans ces conditions on peut fréquemment réduite l'usinage à des passes de finition. Cette précision est rendue possible par une très bonne durée des outillages qui ne sont pas soumis, comme c'est le cas en estampage à chaud, à l'abrasion des oxydes et aux chocs thermiques.

La lubrification est parfaitement efficace à froid, ce qui n'est pas le cas à chaud. La réalisation des outillages en aciers durs et en carbures de tungstène, et leur présentation finement polie, confèrent aux pièces un excellent état de surface. L'amélioration des caractéristiques mécaniques des pièces forgées à froid résultant de l'écrouissage, permet de supprimer des opérations de traitement thermique ou encore d'utiliser des métaux moins chers pour arriver aux mêmes résultats.

Le développement de cette méthode de formage ne peut pas être envisagé, toutefois, sur les aciers très chargés en carbone. On se limite à des teneurs maximales de 0,45 % de carbone et à des aciers faiblement alliés.

Dans ce même domaine de la déformation à froid, on développe actuellement la technique du travail sous pression hydrostatique. Ce développement se fait surtout dans le filage à froid. Il consiste (fig. VII-49) à placer le métal à filer dans une enceinte contenant un liquide sous haute pression. Les pressions utilisées varient suivant la nature du métal et le degré de réduction de section. Elles sont voisines de 10 kbar. La mise sous pression du métal lui confère une ductilité beaucoup plus grande et par conséquent permet soit de réaliser des réductions de section plus importantes, soit de déformer des matières peu ductiles, des fontes par exemple.

3.4.3. Le forgeage à température moyenne. — Ce procédé est un compromis entre le froid et le chaud. Il consiste à déformer les aciers à une température telle qu'il n'y ait ni oxydation ni transformation de structure, que le phénomène d'écrouissage n'apparaisse pas quelle que soit la composition de l'acier, et que la précision des produits soit maintenue voisine de celle obtenue à froid. La gamme de températures est en pratique de 300 à 700 °C. Cette technique permet de déformer des aciers durs tels que les aciers pour roulements à billes 100 C 6 mais le problème essentiel reste, comme dans le forgeage à chaud, celui de la lubrification des outillages. Les différentes solutions actuellement envisagées n'égalent pas l'efficacité de la bondérisation dans le travail à froid.

Les applications de ce procédé restent timides, principalement pour cette raison.

3.4.4. Ébauches frittées. — On travaille actuellement à la mise au point d'un procédé de forgeage d'ébauches obtenues par frittage des poudres métalliques pour obtenir des pièces de caractéristiques mécaniques comparables à celles des pièces classiques. Cette recherche n'a pas comme seul promoteur l'industrie de l'estampage mais aussi, et surtout, les fabricants de poudres métalliques.

Le développement des fabrications de poudres est limité du fait des mauvaises caractéristiques des pièces obtenues par frittage (la cause essentielle est leur porosité). Si l'on forge une ébauche frittée, on fait disparaître cette porosité : la densité relative par rapport au métal compact dépasse 99 %.

Le premier problème à résoudre est cependant celui des poudres : prix élevé (près du double de celui des produits habituels), composition, pureté.

Ces recherches méritent cependant d'être suivies sans que l'on puisse préjuger de leur développement industriel.

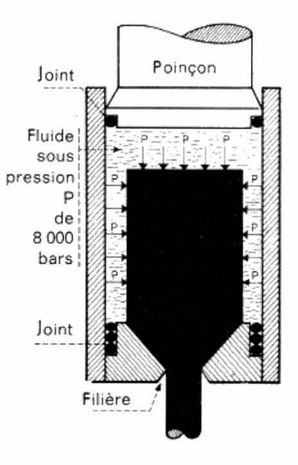


Fig. VII-49

Schéma de principe du filage hydrostatique

4. CONCLUSION

L'estampage est né de la forge mais il y a loin maintenant du travail à l'enclume aux réalisations modernes. Cette industrie passe, comme d'autres, du stade d'un art où l'habileté manuelle était le secret, à celui de la mécanique et des sciences modernes. Elle reste en pleine prospérité, trouve chaque jour de nouveaux débouchés, et est présente dans toutes les grandes réalisations du monde moderne.

SOUDAGE

1. GÉNÉRALITÉS ET TERMINOLOGIE

Le soudage est une opération assurant l'assemblage permanent et continu d'éléments solides, de natures identiques ou différentes. Bien qu'on puisse souder des matériaux très divers il n'est traité ici que du soudage des métaux et alliages, lesquels sont caractérisés par une certaine aptitude à la diffusion entre des parties en contact chauffées ou soumises à une pression.

On distingue deux sortes d'opérations de cette espèce :

1° Le *soudage autogène* ou soudage proprement dit, caractérisé par le fait que le contour des bords à assembler disparaît lors de l'opération. Les nombreux procédés de soudage autogène peuvent eux-mêmes être répartis en deux groupes :

— ceux qui ne nécessitent pas l'application d'efforts extérieurs la liaison étant obtenue par fusion locale des bords ; c'est le soudage sans pression ou encore soudage par fusion ; il peut être exécuté sans ou avec intervention d'un métal d'apport (pour combler un manque de matière) ;

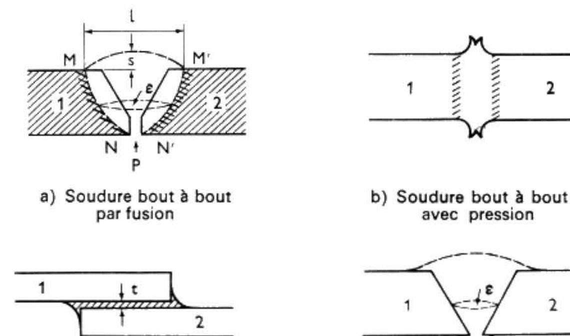
— ceux pour lesquels l'intervention d'un effort extérieur est nécessaire : c'est le soudage avec pression. Les bords à assembler restent quelquefois froids (soudage à froid) mais sont beaucoup plus généralement chauffés, soit modérément, soit au point d'atteindre la fusion locale.

2° Le *brasage* caractérisé par le fait que la géométrie des bords à associer est conservée (à la diffusion métallique près). L'assemblage a lieu par mouillage d'un métal d'apport plus fusible que chacun des éléments à assembler, l'opération étant exécutée à une température supérieure au point de fusion du métal d'apport et inférieure à la fusion des éléments.

Le brasage proprement dit s'opère en milieu isotherme ; les bords à assembler sont étroitement ajustés et le mouillage des bords bien ajustés a lieu par capillarité. Le soudo-brasage a lieu en milieu anisotherme, à bords ouverts, la source de chaleur et le métal d'apport intervenant de proche en proche à la manière du soudage autogène.

Le collage, non traité ici, pourrait, par certains aspects, s'apparenter au brasage ; il en diffère cependant du fait que les liaisons moléculaires qui déterminent la résistance du joint obtenu sont autres que la diffusion qui, d'une manière générale, caractérise les joints soudés.

Remarque : Les termes actifs soudage, brasage, soudo-brasage se rapportent aux opérations exécutées tandis que les substantifs soudure, brasure, soudo-brasure définissent les assemblages réalisés.



a) Soudure bout à bout par fusion

b) Soudure bout à bout avec pression

c) Brasure à joint capillaire par recouvrement

d) Soudo-brasure bout à bout

Fig. 1 — Différents aspects de liaisons soudées

La figure 1 montre l'aspect des différentes liaisons soudées définies plus haut.

La soudure par fusion (donc sans pression) dont la coupe transversale apparaît en *a* est une soudure bout à bout exécutée sur préparation en chanfrein en V (figuré en traits pleins). Les traits pointillés délimitent les contours du métal fondu ; ils rendent compte de l'importance de la fusion des bords et indiquent la largeur *l*, la surépaisseur *s*, la pénétration *p* (en racine) de la soudure terminée. En supposant que le chanfrein soit comblé en une seule fois (soudure en une passe), le rapport entre la section de métal de base fondu et la section totale de métal fondu exprime le taux de dilution du métal de base ; le taux complémentaire est la dilution du métal d'apport. Si la soudure est faite en deux passes (des traits fins précisent l'étape intermédiaire), des taux de dilution propres à chacune des passes peuvent être définis ; la refusion de la zone ε de première passe complique le cas de la seconde passe.

Les rives *MN* et *M'N'* du métal fondu sont les zones de liaison, les régions quadrillées s'étendant au-delà sont les zones du métal de base affectées thermiquement. Elles sont plus ou moins larges selon le comportement métallurgique du métal de base et selon le gradient de température lui-même fonction du mode de soudage, de la nature et de l'épaisseur du matériau.

La coupe transversale *b* correspond à un assemblage en bout exécuté avec pression ; cette coupe peut représenter

soit une soudure par étincelage, soit une soudure par friction. Sous l'effet du ramollissement des extrémités (par échauffement local) et de l'effort axial exercé, les bords à assembler sont forgés à chaud et du métal refoulé sur la périphérie forme bavures. La zone de métal de base affectée thermiquement est plus ou moins large selon le régime thermique appliqué.

La coupe transversale *c* est celle d'une brasure à recouvrement à joint capillaire ; les éléments 1 et 2 présentant un jeu étroit *t* et la région à assembler étant entièrement portée à température convenable, le métal d'apport liquide mouille les surfaces à réunir et emplit le joint par capillarité.

La coupe transversale *d*, est celle d'une soudo-brasure bout à bout. La préparation est analogue à celle d'une soudure par fusion ; l'aspect du métal fondu est identique, mais il n'y a pas dilution, le métal de base n'étant pas fondu. En cas de soudo-brasage en deux passes, la zone de liaison ε de ces passes est une véritable soudure autogène du métal d'apport sur lui-même.

En soudo-brasage ou en brasage, selon la température de fusion et de mouillage du métal d'apport, il y a ou non une zone de métal de base affectée thermiquement.

2. CARACTÉRISTIQUES D'EMPLOI ET DOMAINES D'APPLICATION DU SOUDAGE

Du fait de la diversité des modes de soudage offerts, l'assemblage et le rechargement par soudage ont un champ d'applications étendu en construction, entretien, réparation et transformation des ouvrages.

Toutefois, pour un emploi satisfaisant du soudage, certaines difficultés doivent être connues et maîtrisées. Si la rigidité du joint soudé, découlant de sa continuité même, confère aux constructions soudées de grands avantages de cohésion, en revanche, elle détermine, en cas de présence d'entailles géométriques, des concentrations élevées de contraintes qui sensibilisent l'ouvrage au risque de rupture fragile et à la fatigue. Pour ces raisons, dès la conception des ouvrages soudés il faut apporter un soin attentif dans le choix des tracés aussi bien des ensembles que des détails d'assemblage.

Le soudage étant très généralement exécuté par voie thermique, les échauffements localisés nécessaires peuvent engendrer des déformations et contraintes dans les ensembles. On évite ou compense ces déformations et on limite l'étendue des contraintes résiduelles par un choix approprié des procédés et modes de soudage, par l'emploi d'un métal d'apport éventuel convenable, par l'étude d'une séquence appropriée de soudage. Si, pour des conditions de stabilité ou de sécurité de service, les contraintes résiduelles doivent être éliminées, les traitements nécessaires sont incorporés dans la gamme des opérations.

Les éléments à assembler par soudage doivent être constitués d'un matériau le moins sensible possible à la fissuration à chaud, à la surchauffe, à la fissuration par trempe et au vieillissement dans la zone affectée thermiquement. Le matériau doit être, pour l'épaisseur et la température de service considérés, exempt de risque de rupture fragile ; un traitement de relaxation des contraintes peut réduire l'influence des contraintes résiduelles.

À l'exécution, si toutes les précautions nécessaires ne sont pas prises, des soudures peuvent présenter des défauts de toutes espèce, compromettant la sécurité de la construction. On se garantit vis-à-vis d'un tel risque par un contrôle.

À titre d'exemple le contrôle d'une construction soudée porte sur les différents chapitres suivants :

— rôle, conditions de service et durée de l'ouvrage, choix des matériaux, plans, bases de calcul, conduite des calculs justificatifs. ;
— programme de fabrication, préparations et positions de soudage, séquences de soudage, traitements complémentaires au soudage ;
— constitution des matériaux de base et d'apport ;
— qualification des soudeurs ;
— exécution ;

Après réalisation :
— contrôles non destructifs des soudures (aspect, radiographie, ultrasons, contrôles de surface) ;
— essais de coupons témoins ;
— inspection finale et épreuves.

Beaucoup de constructions, ne nécessitent pas tous ces contrôles ; par ailleurs, dans le cas de fabrication de série, un contrôle par sondage peut suffire. En outre certains procédés de soudage garantissent plus que d'autres la constance de la qualité et l'absence, probable ou certaine, de défauts déterminés.

3. PROCÉDÉS DE SOUDAGE PAR FUSION

L'application d'un effort extérieur étant inutile, ces procédés sont utilisables sans restriction de dimension des éléments à assembler, aucune gorge de machine ne limitant l'encombrement de la construction.

Deux modes de soudage, ne nécessitent qu'une seule opération : le versage du métal d'apport liquide (qui est aussi la source essentielle de chaleur) dans un moule à la constitution duquel les bords à souder participent. Il s'agit du *soudage à la poche* et du *soudage aluminothermique.*

À ceux-là près, tous les autres procédés de soudage par fusion sont exécutés de proche en proche, la source de chaleur, quasi ponctuelle et le métal d'apport éventuel balayant le joint à une vitesse *v* constante convenant à l'exécution de la soudure soit en une, soit en plusieurs passes.

Soit *W* le flux de chaleur que la source cède chaque seconde à la pièce à souder ; l'énergie spécifique de soudage $q = \frac{W}{v}$ (en joules par centimètre) caractérise le régime thermique de l'opération.

En régime établi et en fonction de l'épaisseur et de la nature de la pièce à souder, la répartition instantanée de température dans le métal, autour de l'impact *O* de chaleur, a l'allure donnée par les courbes isothermes pointillées de la figure 2. Dans l'axe de la soudure, en avant de *O*, la montée *AB* de température jusqu'à la fusion est très rapide, tandis qu'en arrière, la descente *CD* jusqu'à la température ambiante est plus lente. L'intervalle *BC* correspond à la présence du bain de fusion constitué des bords à souder et du métal d'apport simultanément fondus. L'intervalle *OE* donne la demi-largeur de la soudure, *EF* donne idée de la largeur de bande de métal de base affectée thermiquement ; il peut y avoir surchauffe, trempe ou les deux à la fois. La courbe *CD* exprime en fonction de *v*, la vitesse de refroidissement dans la zone fondue tandis qu'une courbe latérale telle que *C'D'* donne l'allure du refroidissement du métal de base hors de la zone fondue. Si, au lieu de partir de la température ambiante, les éléments à souder sont préchauffés, le régime thermique est modifié : la tendance à la trempe diminue mais le risque de surchauffe s'accroît. En un mot, le soudage constitue une véritable opération métallurgique sans conséquence sur des métaux et alliages peu sensibles, mais à étudier attentivement dans le cas de matériaux à traitements.

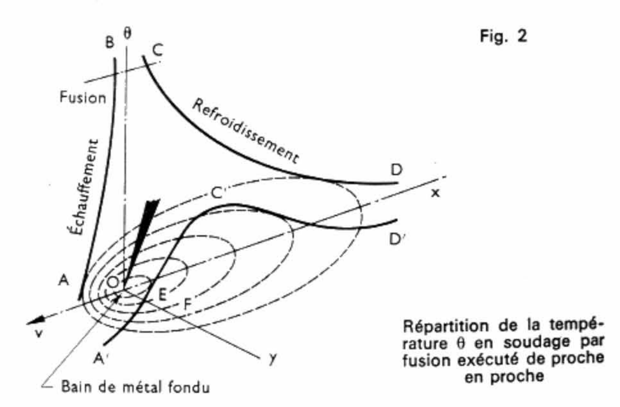


Fig. 2 Répartition de la température θ en soudage par fusion exécuté de proche en proche

En soudage de proche en proche correct, on observe que la solidification du métal fondu est méthodique : chaque couche de métal se solidifiant est surmontée d'une couche de métal liquide plus chaud qui en assure la compacité et le dégazage libre.

3.1. Soudage à la poche. — Ce procédé archaïque, complément de la fonderie, n'est plus guère utilisé à notre époque, si ce n'est pour la réalisation de certaines ébauches en vue de la confection d'aciers plaqués par laminage. En revanche, il prend tout son intérêt pour la fabrication par coulée centrifuge de tubes en acier ou en fonte plaqués. Dans ce type de fabrication, le matériau le moins fusible est coulé en premier lieu et dès qu'il est solidifié, le métal le plus fusible est coulé par-dessus (pour constituer le revêtement intérieur).

3.2. Soudage aluminothermique. — Le soudage aluminothermique (découvert en 1894), perfectionnement du soudage à la poche, est applicable aux aciers et au cuivre. Il consiste à obtenir un métal d'apport très chaud (plus de 2 000 °C) en faisant réagir de l'aluminium en grenaille sur de l'oxyde de fer ou de cuivre, qui sont des oxydes faciles à réduire. Avec les oxydes de fer, par exemple, on obtient la réaction suivante :

Oxyde ferreux : $800 \text{ g FeO} + 200 \text{ g Al} \rightarrow 620 \text{ g Fe} + 380 \text{ g } Al_2O_3^- + 28\,500 \text{ kJ}$

Oxyde ferrique : $750 \text{ g } Fe_2O_3 + 250 \text{ g Al} \rightarrow 530 \text{ g Fe} + 470 \text{ g } Al_2O_3^- + 31\,500 \text{ kJ}$

Les régions d'éléments à assembler ou de pièces à réparer ou à recharger par soudage sont enserrées, en position convenable, dans un moule en sable hautement réfractaire comportant pour empreinte l'emplacement de la soudure ou du rechargement, le jet de coulée en source ainsi qu'un évent à la partie supérieure. Un chenal, bouché ensuite, est généralement ménagé. Il sert au préchauffage de l'ensemble par un brûleur (fig. 3).

Le mélange réactif, dénommé *thermit* ou *calorite*, auquel on adjoint, dans le cas d'acier, de la mitraille pour tempérer la réaction et des ferro-alliages pour améliorer le produit, est placé dans un creuset disposé au-dessus du bassin de coulée. Un courant électrique, une flamme ou une poudre d'amorçage, portant à 1 300 °C un point du mélange, amorce la réaction très rapide ensuite. Par un trou de coulée à la base du creuset, le métal engendré est versé dans l'empreinte et le soudage a lieu. L'alumine résiduelle qui surnage en excès est recueillie dans le bassin de coulée.

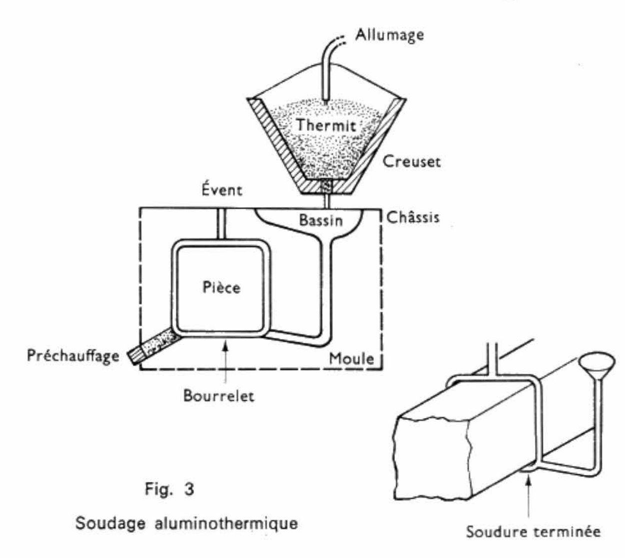


Fig. 3

Soudage aluminothermique

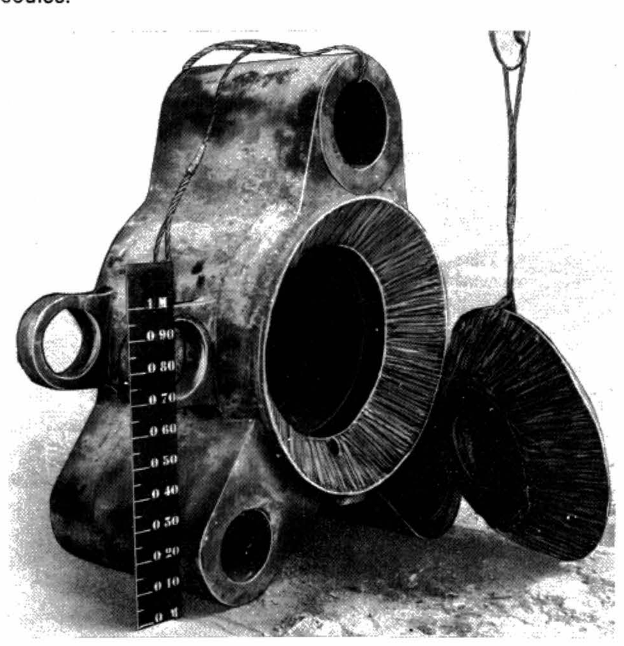
Ce procédé convient notamment à la réparation de très grosses pièces d'acier moulé (fig. 4). La S.N.C.F. l'exploite pour l'assemblage sur voie des éléments en longues barres de rails de 80 m de long (elles-mêmes produites en atelier en raboutant par soudage par étincelage des barres courantes de rails laminés).

3.3. Soudage oxyacétylénique. — Une température de flamme élevée est obtenue par réaction d'un mélange de gaz combustible et d'oxygène débité par un chalumeau à une vitesse supérieure à celle de la propagation de cette réaction (cela évite toute rentrée de flamme).

L'acétylène C_2H_2 est pratiquement seul utilisé en soudage car étant un hydrocarbure fortement exothermique, sa vitesse de propagation de combustion est importante. Il brûle en fournissant une flamme courte à chaleur concentrée. La réaction se produit en deux temps bien distincts (fig. 5).

- $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2\,CO + H_2 + 20\,000$ kJ par mètre cube d'acétylène (réaction 1)
- $4\,CO + 2\,H_2 + 3\,O_2 \rightarrow 4\,CO_2 + 2\,H_2O + 38\,500$ kJ par mètre cube d'acétylène (réaction 2).

Pour éviter l'éblouissement en surveillant le bain de fusion et se protéger des projections, le soudeur porte des lunettes de verre de teinte foncée pour les métaux à haut



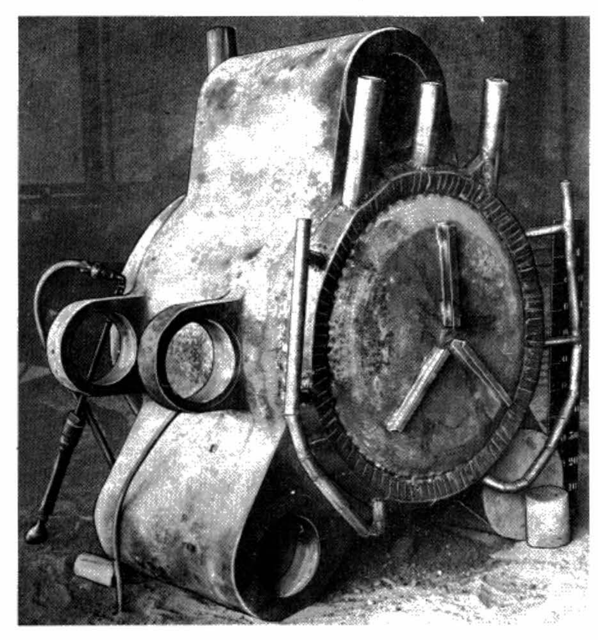


Fig. 4 — Remplacement d'un fond de pot de presse par soudure aluminothermique, à gauche préparation, à droite après soudage (*Aciéries de Gennevilliers*)

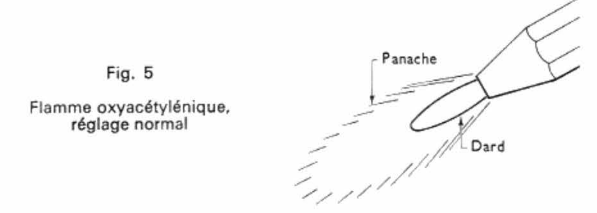


Fig. 5

Flamme oxyacétylénique, réglage normal

point de fusion, de teinte claire pour le soudage de l'aluminium, non teinté pour le soudage du plomb.

La combustion primaire (réaction 1), à volumes égaux d'acétylène et d'oxygène, est localisée au *dard* qui, pour une flamme neutre bien réglée, est lumineux et à contours nets.

La combustion secondaire (réaction 2) a lieu ensuite dans l'air ambiant ; elle constitue le *panache* de la flamme.

Ce fractionnement de combustion en deux temps distincts facilite le réglage de la flamme qui est à volonté carburante (pour rechargements d'aciers durs), normale (soudage usuel) ou oxydante (soudage des laitons, trempe superficielle). Le réglage normal procure à la flamme un pouvoir réducteur suffisant vis-à-vis des oxydes faibles, tels que ceux du fer et du cuivre.

Ces avantages naturels ont fait que de 1901 (invention du chalumeau oxyacétylénique par Ch. Picard) jusqu'en 1925 (début industriel réel du soudage à l'arc électrique), le soudage oxyacétylénique a été le seul procédé exploité, pour souder par fusion de proche en proche. Il s'applique à tous les métaux et alliages usuels, sauf le tungstène.

L'acier au carbone est soudé sans flux ; en revanche, des flux sont utilisés pour les aciers contenant du chrome, les aciers inoxydables, le nickel et ses alliages, les alliages cuivreux, etc. Pour l'aluminium, le magnésium et les alliages, un flux est également nécessaire et comme les flux les plus actifs sont corrosifs, les soudures terminées doivent être ensuite soigneusement lavées ; elles doivent être pénétrées afin de ne retenir aucune trace de flux résiduel.

Concurrencé par des procédés plus perfectionnés et plus rapides, le soudage oxyacétylénique reste néanmoins avantageux dans le domaine artisanal, la réparation, l'entretien et l'installation de petites et moyennes tuyauteries. Son équipement est transportable, voire portable, peu coûteux et n'exige aucun branchement électrique. Le chalumeau soudeur est un instrument simple. Généralement, l'acétylène à plus faible pression est entraîné par l'oxygène sous 1 à 1,5 bar de pression (chalumeau à basse pression) ; habituellement les chalumeaux sont à débit variable soit par lance interchangeable, soit par simple changement du diamètre de la buse, l'injecteur à aiguille étant réglable (fig. 6).

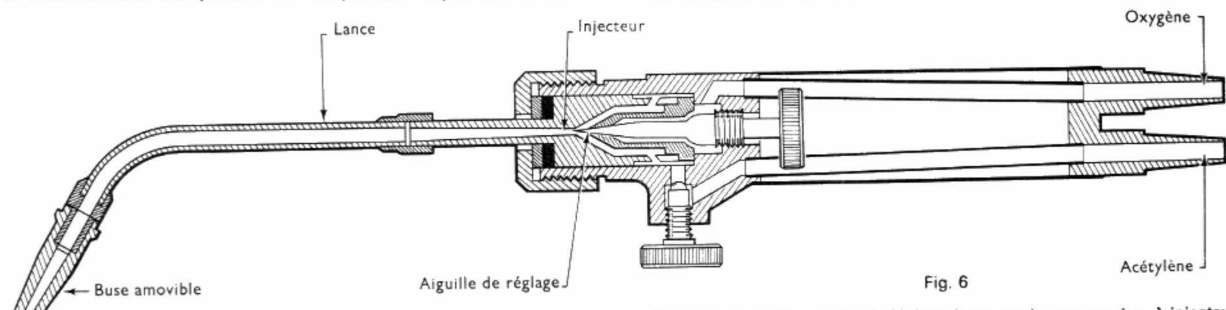


Fig. 6

Chalumeau soudeur oxyacétylénique haute ou basse pression, à injecteur réglable

Quelques indications sur les formes d'utilisation de l'oxygène et de l'acétylène sont données à propos de l'oxycoupage (V. t. 3, Découpage, § 2). L'emploi de ces gaz exige certaines précautions ; l'oxygène sous pression enflamme spontanément certains corps combustibles : il ne faut donc jamais graisser le matériel recevant de l'oxygène. L'acétylène forme avec l'oxygène ou l'air, sous des proportions étendues, des mélanges explosifs ; il faut donc se méfier des fuites et des dangers aux transvasements de ce gaz.

Le soudage oxyacétylénique permet de souder en toutes positions et s'accommode de préparations peu précises ; il permet un modelage aisé de la zone fondue. Par ailleurs, il constitue un moyen de chauffe localisée apprécié pour le forgeage, le chaudronnage local, la chaude de retrait, les recuits à la volée, la trempe superficielle, les rechargements, le décapage à la flamme, l'oxycoupage, le brasage et le soudo-brasage. Son emploi correct exige une bonne qualification du soudeur. Actuellement, en raison du moindre emploi de ce procédé, cette qualification nécessaire fait souvent défaut.

L'étendue du champ de chaleur de cette flamme évite les tapures des matériaux fragiles mais détermine des déformations et contraintes de retrait importantes sur de grandes pièces. Sur petites pièces, en revanche, du fait de la répartition de la chaleur, ces effets sont négligeables. Les dispositions à assemblages bout à bout ou à angle extérieur sont les plus recommandables. Il faut chanfreiner les bords à souder au-dessus de 3 mm d'épaisseur ; le chanfrein est ouvert de 70 à 90°. La puissance de flamme nécessaire exprimée en litres d'acétylène débités par heure est, par millimètre d'épaisseur à souder bout à bout, de :

100 l/mm pour l'acier doux ;
75 l/mm pour les aciers spéciaux ;
150 l/mm pour la fonte à froid ;
75 l/mm pour la fonte préchauffée au rouge ;
300 l/mm pour le cuivre ;
80 l/mm pour les laitons ;
70 l/mm pour l'aluminium et ses alliages ;
15 l/mm pour le plomb ;
30 l/mm pour le soudo-brasage des aciers et des fontes.

En réglage normal, la consommation d'oxygène est environ 1,2 fois celle d'acétylène.

Pour métal d'apport on utilise généralement un fil de diamètre approprié, de même composition que le métal à souder. Pour l'acier on consomme généralement 1 g de fil par litre d'oxygène utilisé.

3.4. Soudage électrique à l'arc. — C'est en 1889 que, pour la première fois, l'ingénieur russe Slavianov fit une soudure sur fer en faisant jaillir un arc électrique entre la pièce et une électrode en fil de fer. Plus de trente-cinq ans ont séparé cette expérience initiale de l'essor industriel de la soudure à l'arc.

Dates d'apparition des variantes de soudage à l'arc (les couples de dates indiquent les cas de périodes de mise au point industrielle prolongée) :

— électrodes enrobées 1907-1925
— fil fourré 1925-1956
— flux en poudre 1935
— procédé T.I.G. (V. § 3.4.4) 1926-1944
— procédé M.A.G. (V. § 3.4.6) 1952-1958
— procédé vertical sous laitier.......... 1950
— procédé vertical soutenu sous gaz 1960
— plasma 1922-1965

L'arc électrique correspond au passage d'un courant entre deux électrodes conductrices, dans un milieu gazeux très ionisé. Il s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur et d'une émission de lumière.

L'arc étant amorcé, sur l'électrode négative (cathode) se forme une tache brillante, dite tache cathodique, d'où partent les électrons se dirigeant vers une tache plus vive encore située sur l'électrode positive (tache anodique).

La colonne de gaz qui se trouve sur le trajet des électrons portée à haute température, est rendue conductrice et lumineuse par ionisation partielle. L'oxygène qui s'ionise négativement par capture d'un électron migre vers l'anode ; tous les autres gaz, ionisés positivement par perte d'un électron, migrent vers la cathode. Les électrons se déplacent à une vitesse de 100 m/s environ, tandis que les ions cheminent à 1 m/s seulement ; l'ensemble forme un milieu électriquement neutre, dénommé plasma.

Ce flux de gaz ionisés, lié aux taches cathodique et anodique, dépend de la nature et de la concentration des gaz porteurs, de l'intensité de courant, de la nature des électrodes et de la distance qui les sépare. Il s'infléchit sous le courant ascendant des gaz chauds, d'où le nom d'arc qu'il a reçu.

Des courants d'air intenses peuvent également le dévier et nuisent à sa stabilité (soufflage d'arc). En tant que conducteur de courant, l'arc peut aussi être dévié par des champs magnétiques (soufflage magnétique).

En soudage, l'arc jaillit très généralement entre une électrode et la pièce à souder. L'électrode est soit réfractaire, soit fusible.

L'électrode réfractaire peut être en tungstène ou en carbone (graphite). Cependant, l'électrode en charbon, très répandue jusqu'en 1930, n'est plus guère utilisée. Seuls, le procédé T.I.G. et la torche plasma utilisent l'électrode de tungstène. Tous les autres procédés de soudage à l'arc sont à électrode fusible, celle-ci constituant, en même temps, le métal d'apport pour le soudage. Elle fond au passage du courant et le transfert de métal fondu à travers l'arc donne lieu à de nombreuses observations.

Grossièrement, la température d'un arc de soudage est voisine de 2 400 °C pour la tache cathodique, de 3 200 °C pour la tache anodique, et de 5 200 °C pour la colonne gazeuse.

Pour qu'un arc s'amorce, la cathode doit être assez chaude pour devenir émissive. Dans un déplacement d'électrodes, l'arc est lié à la tache cathodique.

L'arc peut être alimenté en courant continu, l'électrode étant soit négative (polarité directe), soit positive (polarité inverse). Il peut être alimenté encore en courant alternatif, soit à fréquence industrielle (50 Hz), soit à moyenne fréquence (150-300 Hz).

Dans la plupart des procédés de soudage l'arc est apparent. Il n'est pas apparent dans le soudage sous flux en poudre. Dans le soudage vertical sous laitier il n'existe pas. Dans le soudage vertical soutenu sous gaz l'arc est emprisonné. Le port d'un masque ou d'un écran à verre filtrant spécial permet seul de suivre l'aspect de l'arc apparent ; les opérateurs auxiliaires, les visiteurs doivent porter des lunettes protectrices, vis-à-vis du rayonnement spécialement intense dans les cas de soudage T.I.G., M.I.G. ou par plasma.

3.4.1. Soudage avec électrodes enrobées. — C'est la forme ordinaire de soudage électrique à l'arc. L'électrode est tenue par le soudeur qui maintient et dirige l'arc manuellement (fig. 7)

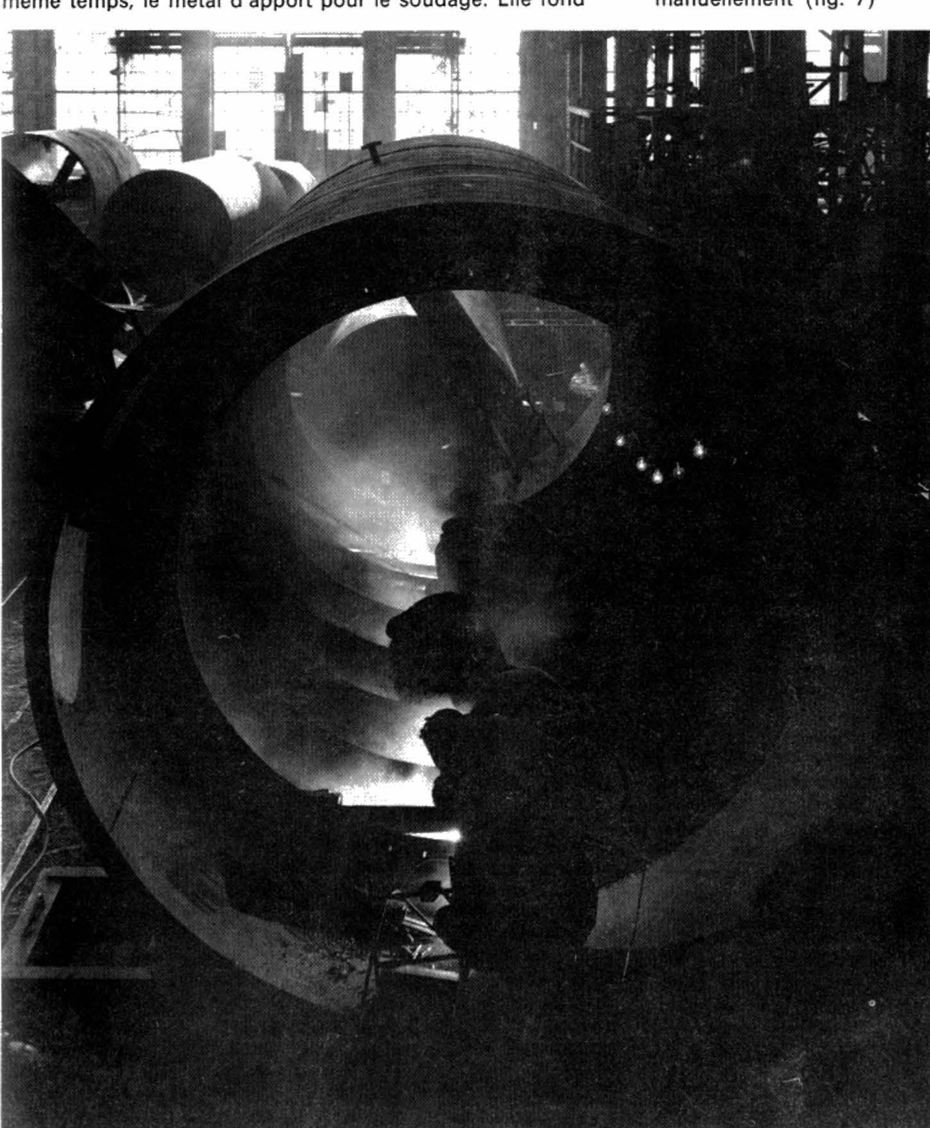


Fig. 7

Soudage simultané par huit soudeurs manuels de supports de plateaux de colonne de lavage en 97 mm d'épaisseur
Diamètre 3,7 m ; longueur 32 m ; masse 97 t.
(*Creusot-Loire*)

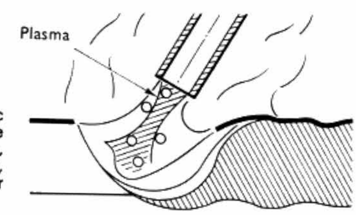


Fig. 8

Aspect schématique d'un arc de soudage avec électrode enrobée. Le laitier protecteur, formé par l'enrobage fondu, est figuré par un trait noir

Le métal fondu de l'électrode passe sur la pièce à souder ou à recharger (fig. 8), sous forme d'une « pluie » de gouttelettes de 0,2 à 3 mm de diamètre suivant le régime d'arc et le type d'enrobage; des courts-circuits se produisent même. Ces gouttelettes sont entraînées par le jet de plasma, les vapeurs du métal surchauffé et les gaz expansés fournis par le métal et l'enrobage. La pesanteur joue un rôle peu important. Dans ce régime d'arc, la densité de courant est, trop faible pour que l'effet magnétique de pincement de la veine liquide soit notable. L'incorporation au bain du métal transféré a lieu par capillarité.

Un facteur important de qualité de l'assemblage réside dans le choix approprié des électrodes à utiliser.

1° *Électrodes*. — Une électrode comporte une âme métallique de diamètre normalisé: 1,25 - 1,6 - 2,5 - 3,15 - 4 - 5 - 6,3 - 8 ou 10 mm (en fait, les diamètres usuels sont 2 - 2,5 - 3,15 - 4 - 5 - 6,3 et 8 mm). Les longueurs sont les suivantes:

— 250 mm pour une électrode de 2 mm de diamètre,
— 350 mm pour une électrode de 2,5 mm de diamètre,
— 350 à 450 mm pour une électrode dont le diamètre est compris entre 3,15 et 8 mm.

Sur toute cette longueur, l'électrode est revêtue d'un enrobage adhérent fait d'un produit approprié disposé en épaisseur très uniforme. Une extrémité est conditionnée pour faciliter l'amorçage, l'autre est dénudée sur 20 mm de longueur pour être prise dans la pince porte-électrode amenant le courant de soudage.

Selon sa nature l'enrobage joue plus ou moins complètement les rôles suivants:

a) apporter des éléments ionisants facilitant l'amorçage, le maintien de l'arc et le transfert correct du métal;
b) procurer un guidage géométrique de l'arc en fondant un peu en retard par rapport à l'âme;
c) former un laitier qui, enrobant le métal en fusion, le protège de l'air, réduit les pertes par crachements et volatilisation, assure (par effet capillaire) sa division en gouttes fines durant son transfert dans l'arc. Ensuite, surnageant le bain de métal fondu, il facilite l'incorporation de l'apport transféré et protège l'ensemble de l'action de l'air ambiant. Par capillarité il se répand au-delà du bain, sur le métal chaud de la pièce, agit sur les oxydes et impuretés superficielles, les scorifie aussi bien en surface qu'en fond de chanfrein. Ainsi, tant en surface que latéralement et en racine, il prépare une bonne liaison du métal fondu avec le métal de base porté à fusion commençante;
d) fournir les éléments réducteurs neutralisant l'action oxydante de l'air environnant;
e) apporter certains éléments compensant les pertes lors de la fusion du fil afin de rétablir, dans le métal déposé, la composition initiale du métal de l'âme;
f) fournir même des éléments complémentaires enrichissant le métal déposé en éléments d'alliages (électrodes alliées dites synthétiques à âme d'acier doux);
g) apporter des éléments combustibles qui créent, en brûlant dans l'air, un mélange gazeux protégeant de l'oxydation le métal fondu (électrodes cellulosiques).

En considérant, en premier lieu, le cas de l'acier, on distingue cinq types principaux d'enrobages symbolisés par les lettres qui suivent:

O: oxydant limité aux rôles *a*, *b* et *c*
A: acide
R: rutile
B: basique
(*A*, *R*, *B*: dont les rôles désoxydants et améliorants *d* et *e* sont diversement assurés)
C: cellulosique

O: L'enrobage oxydant est composé essentiellement d'oxyde de fer qui est un stabilisant de l'arc et de silicates naturels qui sont des scorifiants. Il convient seulement au soudage à plat et en gouttière; les cordons obtenus sont plats, de belle apparence, peu pénétrants et de caractéristiques mécaniques médiocres. Il est utilisé pour des fabrications de tôlerie ou de serrurerie peu sollicitées. L'électrode s'emploie en courant continu (généralement électrode négative) et en courant alternatif.

A: L'enrobage acide épais ou semi-épais comporte, outre les produits précédents, des ferro-manganèse, ferro-silicium et ferro-titane jouant un rôle améliorant sur le métal déposé. Le laitier est abondant et fluide; les cordons déposés sont plats et étalés. Le soudage en position est difficile, sauf en cas de soudage d'angle; le métal déposé est très sensible à la fissuration à chaud. L'électrode s'emploie soit en courant continu (polarité généralement négative), soit en courant alternatif.

R: Cet enrobage contient de l'oxyde de titane en forte proportion (rutile ou plus généralement ilménite) pour stabiliser l'arc et des éléments améliorants: silicates et ferro-alliages. Ainsi l'arc est stable en toutes positions. Les dépôts sont faciles, de bon aspect, de caractéristiques mécaniques élevées mais ils présentent (à un degré moindre qu'avec l'enrobage acide) quelques risques de fissuration à chaud. L'électrode est utilisable aussi bien en courant continu (polarité négative) qu'en courant alternatif. L'amorçage est facile, même sous tension relativement basse; l'arc est très stable.

B: L'enrobage basique est fait de carbonate de calcium ou de magnésie, de désoxydants (ferro-alliages) et de fondants (spath, fluor). Le laitier est compact et peu abondant; le métal déposé présente le minimum de risque de fissuration à chaud grâce à l'action désulfurante du laitier basique; ses performances mécaniques sont très bonnes. On peut souder en toutes positions. Les dépôts sont bombés et d'aspect rugueux. L'arc est moins stable qu'avec les électrodes qui précèdent. On soude généralement en courant continu (électrode positive). Cependant, beaucoup d'électrodes de ce type, qui comportent des éléments stabilisant l'arc, s'accommodent de courant alternatif si la tension d'amorçage dépasse 70 V.

C: Cet enrobage contient de la cellulose (teneur importante) ainsi que des silicates et des ferro-alliages aux rôles scorifiant et améliorant. La combustion de la cellulose se fait avec dégagement de gaz protecteurs. Le laitier est peu volumineux; la fusion est rapide et les cordons sont d'aspect grossier. Cependant, la pénétration de la première passe en fond de chanfrein est excellente. Le soudage en position est aisé, surtout en soudage vertical descendant, (d'où l'emploi pour le soudage de pipelines). Le métal déposé présente peu de risque de fissuration à chaud. Les caractéristiques mécaniques sont moyennes. Ces électrodes sont utilisables en courant continu sous tension d'amorçage assez grande, quelques unes cependant peuvent être employées en courant alternatif. Certaines électrodes de ce type, à tension d'arc très grande, assurent une forte pénétration de la fusion.

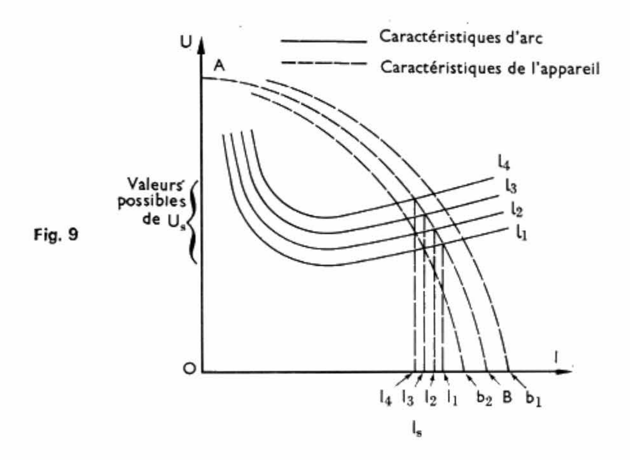
Les électrodes cellulosiques comportant des matériaux organiques renferment une certaine proportion d'eau et, pour la conserver, il faut les placer dans une ambiance d'hygroscopicité moyenne. Elles ne doivent pas être étuvées.

Les électrodes rutiles, acides ou oxydantes sont à tenir au sec ou, si nécessaire, être étuvées avant emploi à la température maximale de 150 °C.

Les électrodes basiques dont l'enrobage est réfractaire peuvent supporter des températures de véritable cuisson pouvant atteindre 400 °C.

Toutes les électrodes, sauf les électrodes basiques, comportant de l'eau dans leur enrobage, apportent dans le métal fondu jusqu'à 25 cm^3 d'hydrogène par 100 g de métal déposé.

Les électrodes basiques (dites à bas hydrogène), après deux heures de cuisson à 350 °C n'apportent que 3 cm^3 d'hydrogène par 100 g de métal déposé. Seules elles conviennent au soudage des aciers trempants dont elles évitent la fissuration par trempe (dite fissuration à froid). Lorsqu'on veut utiliser des électrodes basiques sur aciers



Effet autorégulateur de la caractéristique tombante d'un appareil par soudage manuel

non trempants, pour éviter les soufflures imputables à un enrobage humide, on se contente de faire, comme pour les électrodes acides ou rutiles, un étuvage à 150 °C.

La norme NF A81—309 définit, conformément à la recommandation ISO, les différents types et nuances d'électrodes enrobées pour soudage des aciers.

Beaucoup d'électrodes actuelles de tous types, pour acier, comportent une proportion plus ou moins grande de poudre de fer dans leur enrobage. Ces électrodes qui déposent plus de métal que ce que l'âme peut fournir sont dites à haut rendement ; leur fusion est calme, facile et l'aspect du dépôt s'en trouve amélioré, particulièrement dans le cas d'électrodes à enrobage basique. Ces électrodes à poudre de fer présentent un cratère profond et elles peuvent fondre, appuyées sur l'enrobage (d'où le nom de fusion automatique manuelle donné à ce mode de fusion).

Les électrodes qui permettent de déposer des aciers à haute caractéristique, des aciers inoxydables ou réfractaires ou des métaux non ferreux sont soit rutiles, soit basiques ; l'enrobage de type basique est, on l'a vu plus haut, obligatoire pour les aciers trempants.

2° *Appareils de soudage manuel à arc.* — Quatre faits caractérisent l'arc de soudage manuel avec électrodes enrobées :

a) les densités de courant sont faibles, voisines de 10 A/mm² de section d'électrode et la vitesse de fusion est assez réduite ;

b) l'électrode étant tenue à la main, la longueur d'arc est très variable. En dépit de ce fait, l'intensité du courant de soudage doit être la plus constante possible ;

c) en cas de coupure d'arc par court-circuit, l'intensité du courant de court-circuit ne doit pas différer beaucoup de l'intensité du courant de soudage ;

d) les variations intempestives de longueur d'arc, les fluctuations de conductivité dues au transfert de métal liquide dans l'arc nécessitent des caractéristiques dynamiques permettant un rétablissement rapide du régime normal de l'arc.

La figure 9 donne la caractéristique statique $U = f(I)$ d'un arc de soudage manuel en fonction de différentes longueurs l_1, l_2, l_3 et l_4 possibles de cet arc. Pour fixer les idées, la tension usuelle U_s d'un arc de soudage est voisine de 25 V ; une caractéristique souhaitable d'appareil de soudage correspond à la courbe tombante en arc d'ellipse *AB*. La tension à vide *A*, proche de 60 V, permet l'amorçage d'un arc normal, les courants (I_1 à I_4) pour les différentes longueurs possibles d'arc (l_1 à l_4) varient peu autour d'une valeur moyenne I_s de soudage. En fait, le soudeur doit disposer de toute une gamme de courants de soudage suivant le diamètre d'électrode et le régime de fusion choisi. Il agit au moyen de réglages soit fixes (par plots tels que Ab_1 - AB - Ab_2) soit continus (entre b_1 et b_2).

En fait, selon leurs dispositions, les appareils fournissent :
— soit une tension à vide constante (fig. 10)
— soit deux tensions à vide, l'une élevée pour petites électrodes, l'autre plus faible pour les grosses électrodes dont l'amorçage est plus facile grâce au courant très intense (fig. 11) ;
— soit une tension à vide propre à chaque réglage (fig. 12),
— soit une tension à vide réglable.

Les appareils de soudage les plus simples et les moins coûteux sont à courant alternatif à fréquence industrielle. Ce sont essentiellement des transformateurs monophasés qui se branchent sur le réseau basse tension (on rappelle que les valeurs des courants et tensions indiquées sont les valeurs efficaces en alternatif).

Un atelier de soudage peut être alimenté par un transformateur monophasé général, sous tension efficace constante de 60 V et chaque soudeur est relié à cet appareil par l'intermédiaire d'une bobine à réactance réglable. Cet équipement déséquilibre le réseau ; il est moins souple et plus coûteux qu'un ensemble d'appareils individuels répartis sur les trois phases d'un réseau triphasé, aussi est-il peu utilisé.

La solution économique et souple est apportée par le transformateur individuel autorégulateur, à fuites magnétiques, soit à bobine de dispersion réglable, soit à bobine coulissante, soit à entrefer variable, soit à shunt magnétique réglable.

Une solution plus coûteuse consiste à associer un transformateur individuel et un transducteur magnétique (inductance saturable). Le réglage peut alors être réalisé à distance, le soudeur agissant simplement sur un rhéostat parcouru par un courant continu (V. t. 1, Électrochimie, chap. 8).

De plus, certains constructeurs fournissent des convertisseurs de fréquence rotatifs alimentés en triphasé 50 Hz et qui produisent un courant monophasé de 150 à 450 Hz réglable par réactance variable.

Pour le soudage en courant continu, la solution d'une distribution générale de courant redressé à 60 V avec résistance de réglage à chaque poste de soudage n'est pas satisfaisante, la caractéristique de l'appareil n'étant pas suffisamment tombante. Aussi, les appareils individuels de soudage soit statiques, soit rotatifs sont-ils également préférés dans ce cas.

Un appareil statique se compose d'un redresseur à semiconducteurs (V. t. 1, Électronique, chap. 18) et, soit

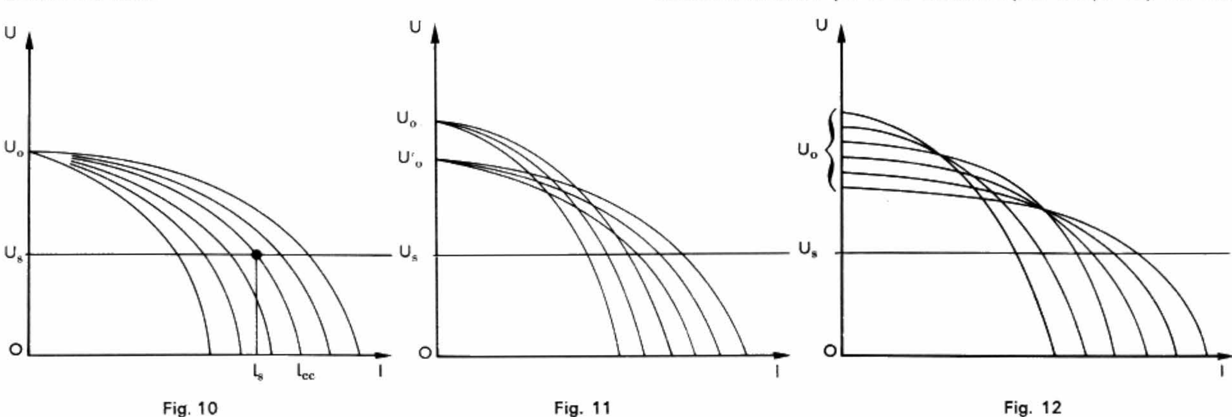


Fig. 10 — Fig. 11 — Fig. 12

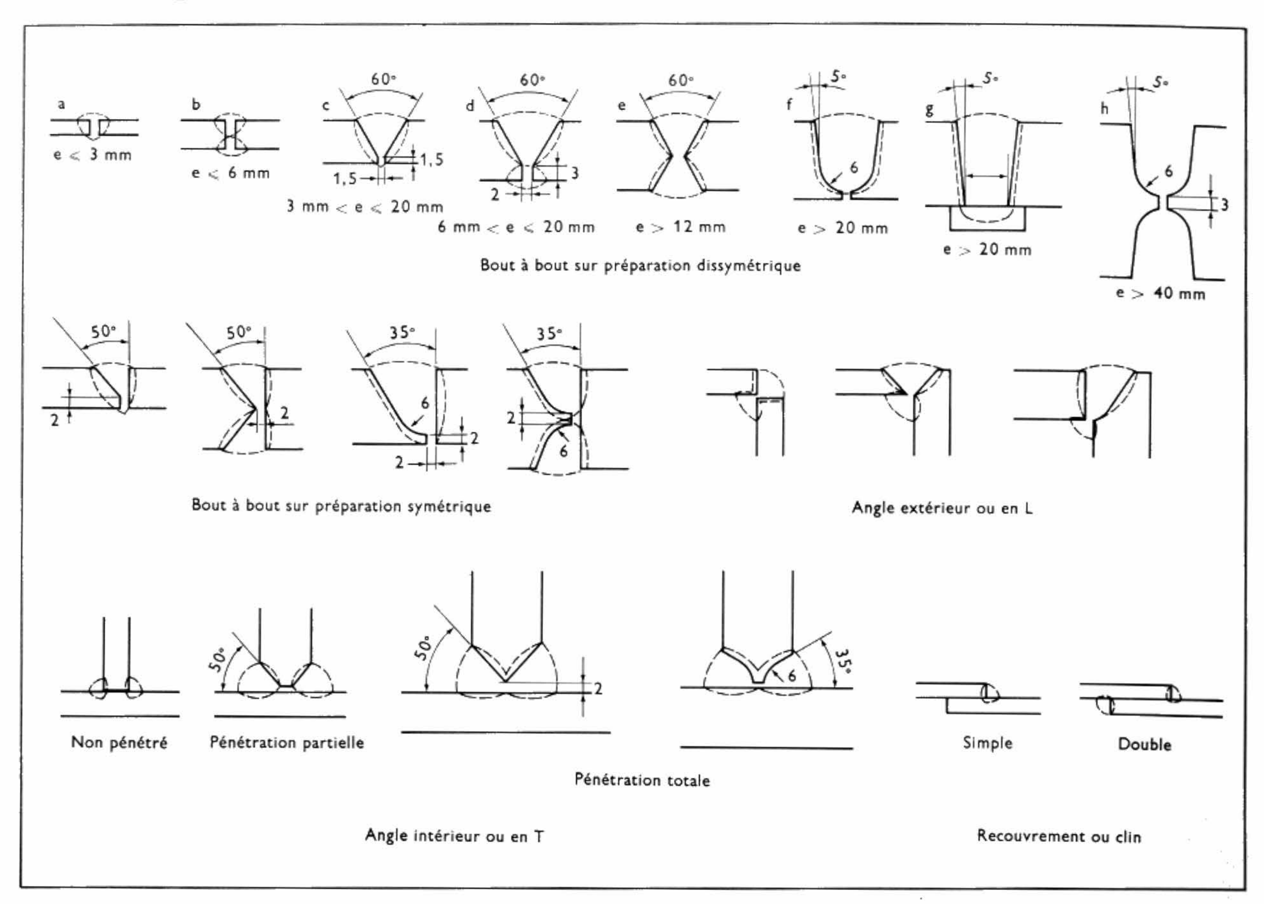


Fig. 13 — Préparations et formes de soudures à l'arc avec électrodes enrobées

d'un transformateur triphasé à fuites magnétiques, soit d'un transformateur triphasé ordinaire (c'est-à-dire qui délivre des tensions de valeurs efficaces sensiblement constantes) associé à un transducteur magnétique.

Un appareil rotatif est une génératrice spéciale autorégulatrice à excitation composée, à flux soustractifs et à forte réaction d'induit. Cette génératrice est entraînée par moteur asynchrone ou par moteur thermique (s'il s'agit de travaux de chantier).

Les appareils de soudage à courant alternatif conviennent à des travaux courants sur acier. Les appareils à courant continu sont recommandés pour des soudures délicates en position ou pour l'emploi d'électrodes à enrobage volatil ou d'électrodes basiques dites à bas hydrogène, ou d'électrodes en métaux et alliages non ferreux, Le courant continu est moins dangereux que l'alternatif en cas de mauvais isolement mais il permet au soudeur non averti d'allonger exagérément l'arc et de faire des collages au lieu de soudages. En outre, il cause des déviations magnétiques de l'arc spécialement en cas de courant continu fourni par génératrice.

Les appareils rotatifs sont coûteux d'achat et d'entretien, mais ils sont indispensables comme groupes électrogènes de chantier. Branchés sur un réseau, ils sont moins sensibles que les transformateurs aux fluctuations de ce réseau.

Les normes NF A85—011, 020, 021, 022, 024, 025 définissent les caractéristiques, les régimes de service et les performances des appareils de soudage.

Le régime conventionnel de soudage est à facteur de marche de 60 %; il correspond à un soudage manuel normal. Il ne peut convenir à un service manuel anormalement intense et encore moins en service automatique continu. Il faut préciser à la commande le régime auquel les appareils seront soumis (fig. 13).

3.4.2. Soudage sous flux en poudre. — La fusion d'électrodes enrobées, soit couchées en moule, soit en automatique manuel sur des montages appropriés constitue une étape intermédiaire vers l'automatisme.

Le soudage automatique avec fil-électrode enrobé ne s'est jamais beaucoup développé. Il a été vite remplacé par le soudage automatique sous flux en poudre utilisant un fil-électrode fusible.

Ce dernier procédé consiste (fig. 14) à déverser, en avant du fil-électrode, un talus de flux granulé de même nature qu'un enrobage d'électrode.

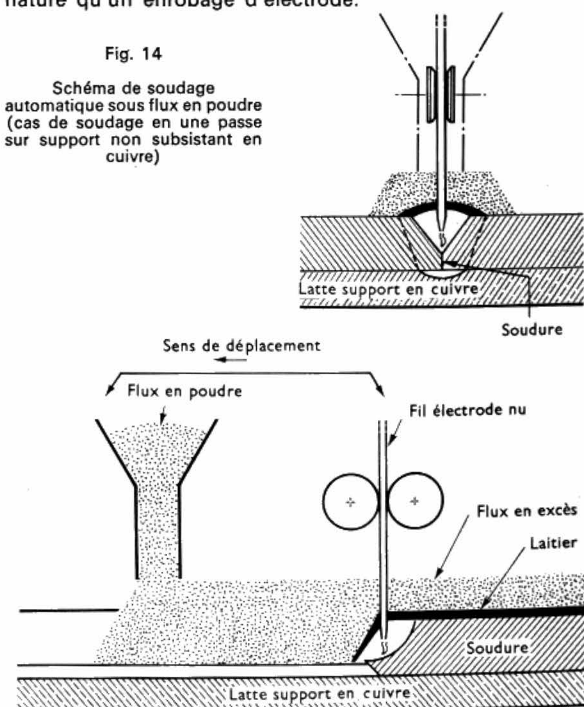


Fig. 14

Schéma de soudage automatique sous flux en poudre (cas de soudage en une passe sur support non subsistant en cuivre)

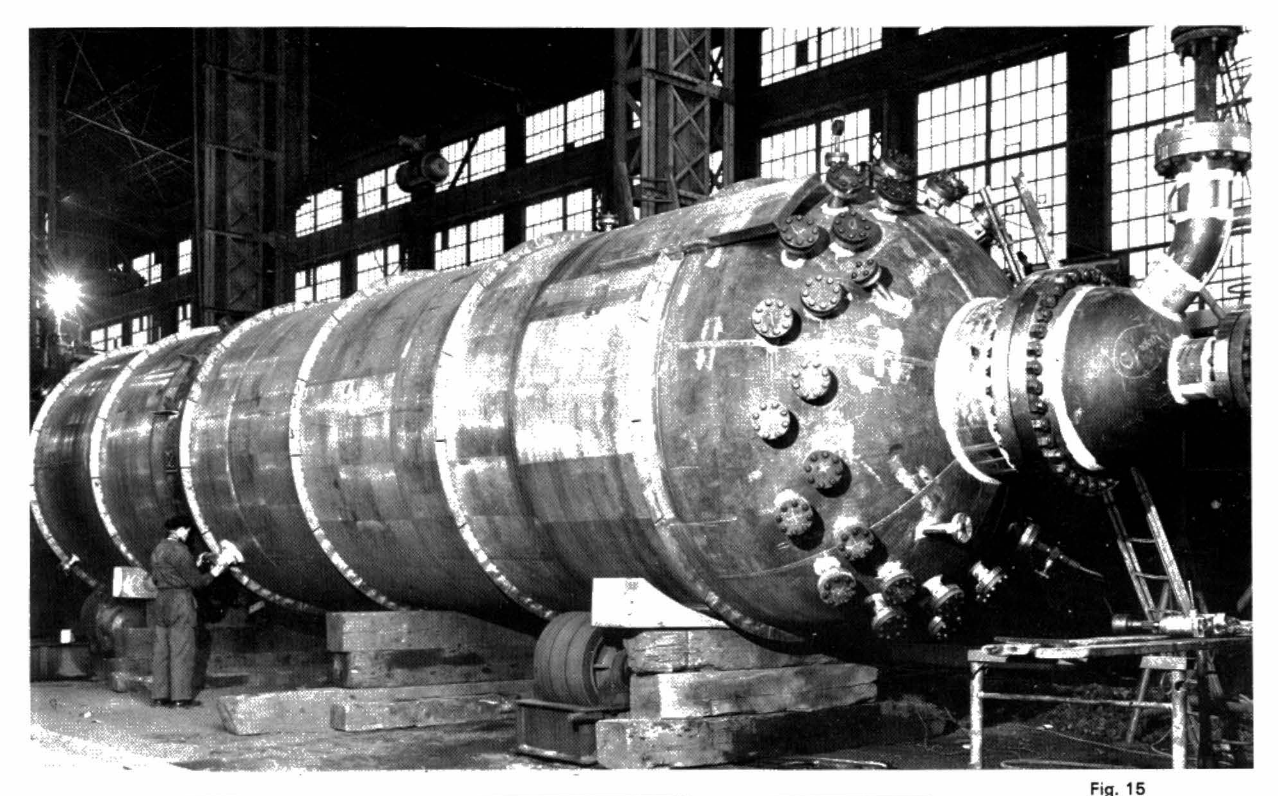


Fig. 15

Réacteur pour l'industrie chimique, en acier inoxydable 18-14-2,5, dit à très bas carbone, en 67 mm d'épaisseur; masse 80 t. Soudures principales exécutées par soudage automatique sous flux en poudre (*Creusot-Loire*)

Fig. 16

Soudage à recouvrement sous flux en poudre de tôles de fond de réservoir de stockage d'hydrocarbures à gauche, l'aspirateur de flux en excès (*Constructions métalliques de Provence*)

L'arc jaillit dans la couche de flux que le fil-électrode traverse. Le flux fond : une partie joue le même rôle que l'enrobage d'une électrode ordinaire et une autre partie forme voûte protégeant le métal fondu. Le fil-électrode a un diamètre de 2 à 9,5 mm selon l'importance à donner au bain de fusion. Le courant est amené par des galets d'entraînement très près du bain de fusion; la densité de courant supportée est de 20 à 30 A/mm², soit deux à trois fois celle admise par les électrodes enrobées; la tension d'arc est de 25 à 40 V. À ce gain de puissance s'ajoute un gain de rendement: les arrêts pour changement d'électrodes sont supprimés. Ainsi, la productivité du procédé peut atteindre le décuple de celle du soudage à l'arc manuel classique.

Bien que les possibilités métallurgiques en soient plus étendues, l'application du procédé se limite aux aciers soit au carbone, soit alliés, soit inoxydables (fig. 15).

Le fil électrode est en acier au carbone ou allié.

Le flux peut être acide ou basique, avec désoxydants et ferro-alliages.

On soude en courant continu si l'intensité ne dépasse pas 500 A et en courant alternatif au-delà. On évite ainsi les déports magnétiques d'arc. L'appareil choisi est généralement à caractéristique tombante et l'avance du fil est commandé par la tension aux bornes de l'arc. Sous la couche de flux en poudre, l'arc est invisible, et, pratiquement, cela impose le soudage automatique. Ainsi protégé, l'arc est à l'abri du vent, ce qui est fort apprécié en chantier (fig. 16).

Fig. 17

Soudage automatique sous flux en poudre simultané à deux têtes. Simulation du cas de soudage des augets raidisseurs des caissons et dalles orthotropes des ponts métalliques modernes (*E.S.A.B.*)

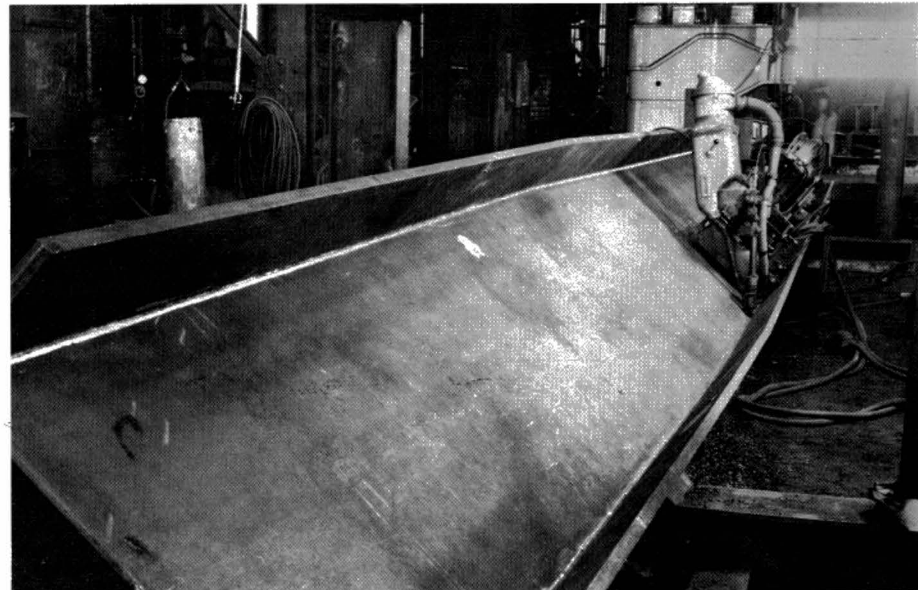


Fig. 18

Soudage automatique sous flux en poudre en gouttière pour réalisation d'une grande poutre en I composée (*E.S.A.B.*)

On peut souder simultanément avec plusieurs têtes de soudage automatique (fig. 17).

Le flux fondu est très fluide, aussi ne soude-t-on normalement qu'en position à plat et les soudures bout à bout pénétrantes doivent être soutenues à l'envers. Les soudures d'angle volumineuses doivent être orientées en gouttière (fig. 18). On soude bout à bout à partir de 2 mm jusqu'à de très fortes épaisseurs.

Suivant les réglages, la fusion est, soit très pénétrante, soit superficielle et étalée. Pour des rechargements à forte cadence, on substitue un feuillard au fil-électrode. La figure 19 donne quelques aspects de préparations pour soudage sous flux en poudre.

Les dépôts de trop forte puissance ayant une cristallisation grossière et une faible résilience, on se limite à des passes de puissance raisonnable, affinées par recuit de l'une par l'autre.

En dépit de la fluidité du laitier, certains équipements avec supportage approprié permettent de réaliser, en plusieurs passes, les soudures en corniche des grands bacs de stockage d'hydrocarbures (fig. 20).

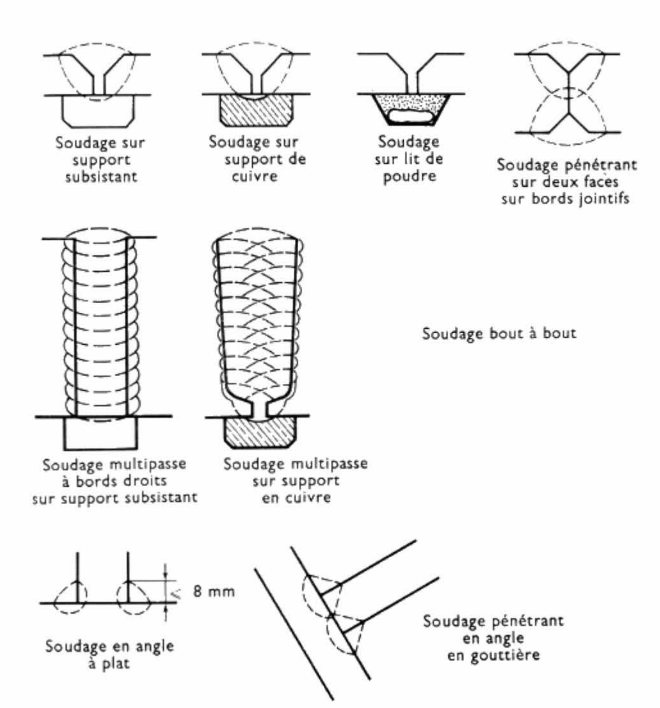


Fig. 19 — Préparations et formes de soudures à l'arc sous flux de poudre

3.4.3. Soudage vertical sous laitier.

— Ce procédé (fig. 21) a été imaginé en U.R.S.S. en essayant d'adapter le soudage sous flux en poudre à la position verticale, le bain de métal fondu étant soutenu latéralement par des lingotières mobiles en cuivre, refroidies par circulation d'eau.

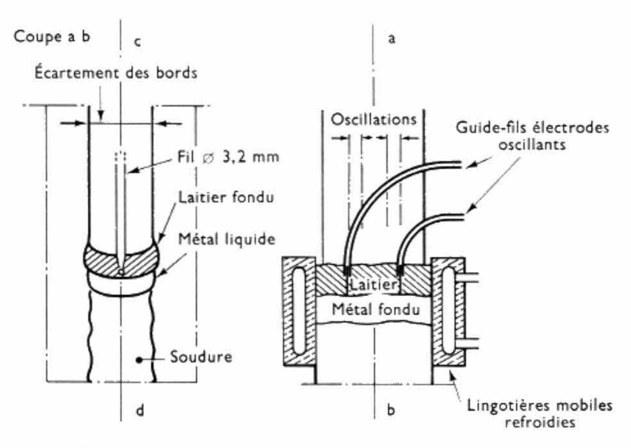


Fig. 21 — Soudage vertical sous laitier à deux fils-électrodes

Après une courte période de fusion normale sous flux en poudre amorçant le bain, on observe que l'arc s'éteint, noyé dans le laitier fondu. Cependant la fusion du fil-électrode se poursuit par simple plongée dans ce laitier, devenu électroconducteur à chaud, car il se trouve porté à 2 000 °C par effet Joule. À travers le laitier, le métal fondu descend vers le bain : son niveau monte et le fond monte aussi par solidification, marquant ainsi la progression de la soudure. Il suffit que l'ensemble porte-électrode et lingotières suive cette ascension. Du fait que l'arc n'existe plus, ce procédé constitue plutôt une variante de soudage par résistance électrique.

Le laitier de soudage vertical est de composition différente du flux de soudage à plat. Il joue le rôle de scorifiant et n'apporte aucun élément d'alliage. On peut souder sous laitier les aciers au carbone ou alliés, l'acier inoxydable, les cupro-aluminium, l'aluminium ainsi que des métaux très sensibles à l'oxydation, tels que le titane, car le métal fondu sous couche de laitier est parfaitement protégé de l'atmosphère ambiante.



Fig. 20 — Soudage automatique sous flux en poudre, en corniche, sur réservoir de stockage de 90 000 m³. En avant, brûleur de séchage (*Tissot et C.E.M.*)

On utilise généralement du fil-électrode de 3,2 mm de diamètre avec des courants de 600 à 800 A, soit une densité de courant de 80 à 100 A/mm², ce qui est très élevé. La soudure progresse à 1,5 m/h environ, quelle que soit l'épaisseur car on multiplie le nombre de fils en conséquence. Pour mieux répartir la fusion, cette batterie de fils est animée d'un lent mouvement de va-et-vient.

Avec 1 seul fil on soude 40 à 60 mm d'épaisseur ;
Avec 2 fils on soude 60 à 100 mm d'épaisseur ;
Avec 3 fils on soude 100 à 150 mm d'épaisseur.
On peut souder ainsi jusqu'à 2 m d'épaisseur.

La préparation est sans chanfrein, les bords sont écartés de 25 à 35 mm selon l'épaisseur (fig. 22).

On soude en courant alternatif pour éviter l'électrolyse du laitier. L'appareil de soudage est alimenté sous une tension de valeur efficace constante et le fil-électrode, déroulé à une vitesse uniforme fonction de l'intensité du courant, commande la progression du soudage.

Le principe du procédé ressemble à la coulée continue ; par ailleurs, la fusion sous laitier constitue un véritable affinage (d'ailleurs, il existe un procédé de refusion de lingots basé sur ce principe). Cependant, la lente progression de la solidification est cause de la structure grossière du métal fondu et de la surchauffe de la zone affectée thermiquement ; aussi, pour des fabrications de qualité, un traitement final de normalisation de la pièce est-il imposé. Par exemple, on utilise ce procédé pour les soudures longitudinales des viroles des appareils à pression de grande épaisseur, ces viroles étant ensuite normalisées ou trempées et revenues ; la construction est achevée par exécution des soudures circulaires sous flux en poudre en rotation (soudures multipasses).

Tirant parti de la puissance de productivité du procédé, un constructeur japonais fabrique des corps d'appareils cylindriques épais, entièrement en métal déposé, en exécutant des couches jointives par soudage en hélice. Par un choix judicieux du pas de l'hélice, chaque spire déposée recuit et affine la structure de la passe précédente.

Si l'assemblage à exécuter est un joint plan n'excédant pas, par exemple 1,5 m de hauteur, la soudure peut être faite verticalement sous laitier avec guide-fils fusibles. Dans ce cas (fig. 23), les fils-électrodes, poussés par de simples dérouleurs de fil du type utilisé en soudage automatique à fil nu ou fourré, s'engagent dans les tubes

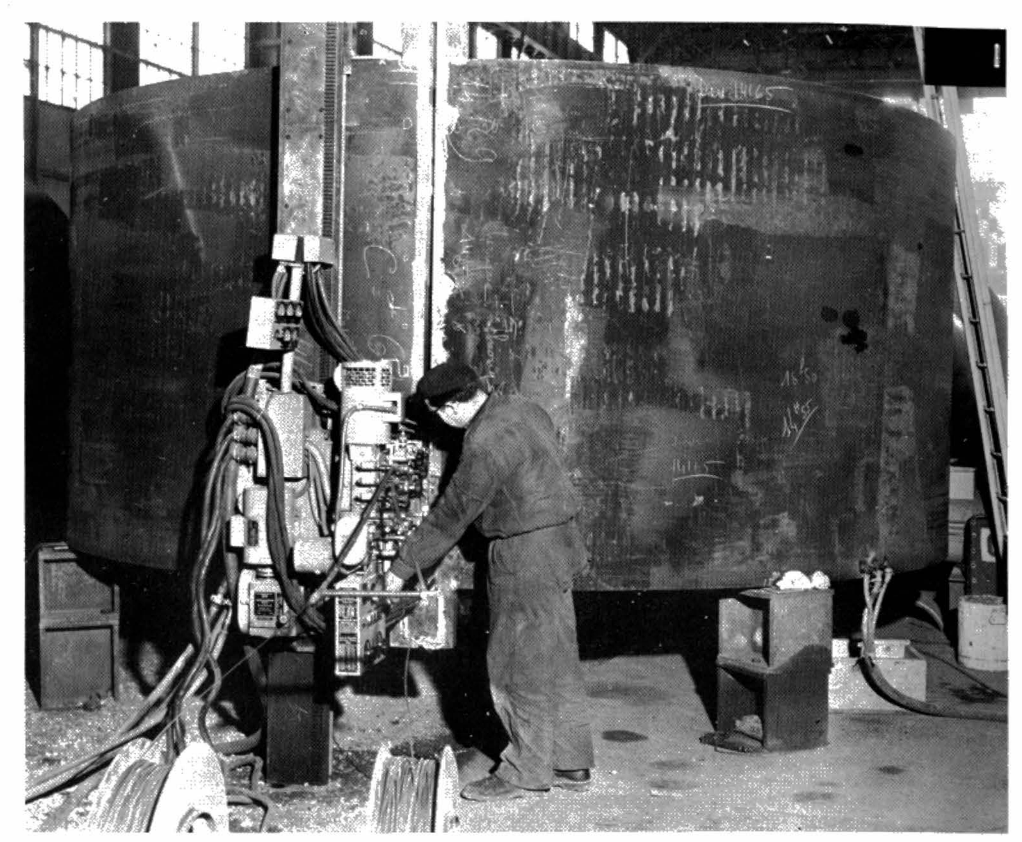


fig. 22

Soudage automatique vertical sous laitier d'une virole de roulement de four à ciment en 80 mm d'épaisseur ; diamètre 4,50 m, longueur 2,30 m (*Creusot-Loire*)

respectifs d'un guide-fil métallique disposé dans le plan du joint. Guide-fils et fils-électrodes fondent simultanément, réalisant ainsi sans mouvement, entre deux longues lingotières latérales, une variante du soudage vertical sous laitier.

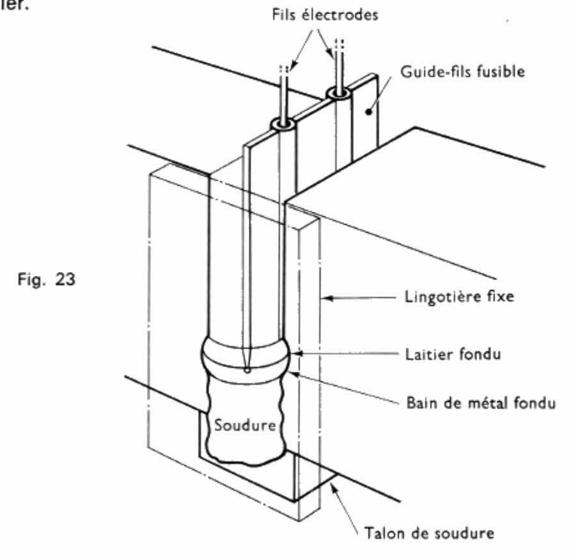


Fig. 23

Soudage vertical sous laitier à guide-fil fusible à deux fils-électrodes

Une autre variante du procédé consiste, pour des épaisseurs comprises entre 20 et 70 mm, en une soudure verticale sur deux ou plusieurs tôles disposées en étoile, un seul fil-électrode opérant au centre du joint (fig. VII-24) ; on peut ainsi assembler verticalement l'âme de grosses poutres en I, les semelles étant assemblées à plat en soudage sous flux multipasse.

3.4.4. Soudage T.I.G. (symbole international pour *tungsten inert gas*). — L'arc jaillit entre une électrode réfractaire et la pièce. L'électrode, portée vers 3 200 °C,

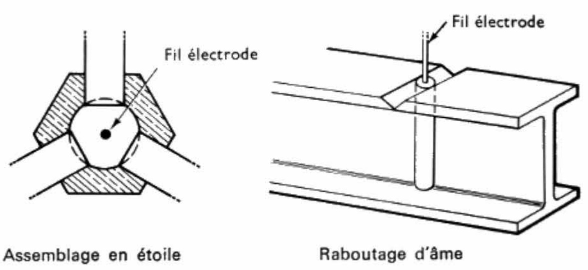


Fig. 24

est soit en tungstène pur, soit en alliage à 1-2 % de thorium ou 0,3-0,5 % de zirconium à pouvoir émissif accru ; elle est entourée (fig. 25) d'une buse amenant un courant de gaz inerte (argon ou hélium ou leur mélange) qui la protège ainsi que le bain de soudure et l'extrémité de la baguette d'apport éventuellement utilisée.

Dans le cas d'emploi de métal d'apport, celui-ci doit être tenu très couché et avancé dans le bain sans risque de provoquer de court-circuit avec l'électrode ; en soudage manuel, du fait de ce risque, le soudeur doit absolument être ganté.

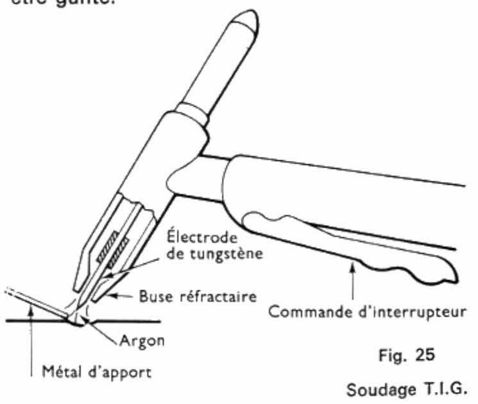


Fig. 25

Soudage T.I.G.



Fig. 26 — Machine automatique pour sertissage et soudage T.I.G. (huit torches) de portes de voitures automobiles (4 pièces/mn). (*Sciaky*)

En soudage T.I.G. manuel, la longueur d'arc est très variable, aussi l'appareil de soudage doit-il être à caractéristique plongeante (V. fig. 9) tout comme en soudage avec électrodes enrobées. Cependant, la tension d'arc est de 10 à 15 V sous argon, 14 à 18 V sous hélium, au lieu de 20 à 40 V en soudage ordinaire.

En soudage T.I.G. automatique, l'arc asservi à une régulation est de longueur beaucoup plus constante et, dans certains cas, la caractéristique tombante ne s'impose pas.

Les diamètres d'électrodes s'échelonnent entre 1 et 5 mm. Les courants ont des intensités comprises entre 30 et 420 A ce qui correspond à des densités de courant de 10 à 20 A/mm^2. Au-delà de 150 à 300 A (suivant le facteur de marche), la torche est alourdie par une circulation d'eau et ce procédé est généralement réservé au soudage automatique (fig. 26).

Le débit d'argon varie de 4 à 15 l/mn selon le courant de soudage ; l'hélium plus coûteux est utilisé en quantité plus grande (dispersion accrue).

Dans le cas de tous les métaux lourds, il est fait usage de courant continu; l'électrode étant négative est émissive, ce qui garantit une moindre usure. On utilise soit un appareil de soudage rotatif, soit un ensemble transformateur-redresseur. Dans ce cas, une inductance dite de lissage permet d'atténuer les ondulations du courant redressé.

Dans le cas de l'aluminium et de ses alliages, du magnésium et de ses alliages, on constate que si l'électrode est négative, malgré un décapage préalable et la protection d'argon, le bain de fusion se trouve recouvert d'une pellicule d'oxyde réfractaire qui s'oppose à toute liaison des éléments à assembler; en revanche, si l'électrode est positive, l'émission électronique dont la pièce est le siège suffit à briser la pellicule d'oxyde et le soudage est possible. Malheureusement, l'électrode soumise au bombardement électronique se désagrège et une grande tension est nécessaire à l'amorçage de l'arc. La solution réside dans l'emploi de courant alternatif: durant l'alternance où l'électrode est négative il y a fourniture de l'essentiel de l'énergie de soudage et durant l'alternance où l'électrode est positive il y a destruction de la pellicule d'oxyde. L'atmosphère d'argon est généralement préférable alors à celle d'hélium. Pour avoir un amorçage correct durant l'alternance où l'électrode est positive il faudrait une tension voisine de 180 V ce qui est inacceptable. On peut utiliser des tensions à vide de 50 à 80 V si l'on produit une étincelle « pilote » à l'aide d'une tension de 1 MHz sous 2 000 à 5 000 V (mais elle donne lieu à des émissions radioélectriques interdites) ou si l'on applique une impulsion de tension de 500 V, trop brève pour être nuisible (elle peut être délivrée par un générateur à condensateur). Pour remédier à l'effet redresseur de l'arc et fournir une énergie suffisante durant la phase où la pièce est émissive on utilise une résistance symétrique (associée à un élément redresseur) ou une batterie d'accumulateurs montés en série avec l'arc ou un dispositif spécial à transducteur fournissant des ondes carrées avec rétablissement de leur symétrie (dans ce cas, une tension à vide de 70 à 80 V dispense de l'étincelle pilote ou de l'impulsion de tension).

En courant alternatif, les perfectionnements apportés au procédé T.I.G. des alliages légers permettent d'éviter l'amorçage de l'arc par frottement d'électrodes, ce qui est néfaste pour sa conservation et ce qui provoque des pollutions de la pièce. En courant continu, le même avantage peut être obtenu en soudage T.I.G. de métaux lourds en faisant agir une étincelle juste au moment de l'amorçage.

D'autres perfectionnements sont apportés au soudage T.I.G.:

— une électrovanne assure l'amenée d'argon avant amorçage de l'arc et maintient le courant d'argon après coupure de l'arc jusqu'à ce que l'électrode et le bain soient refroidis;

— un évanouisseur d'arc évite la formation d'un cratère qui résulterait d'une coupure brusque du courant en fin de soudage;

— un réglage complémentaire permet d'obtenir un courant plus intense en début de soudage (commande au pied en soudage manuel). Par la pureté de son action le soudage T.I.G. permet le soudage des métaux et alliages les plus variés, les plus délicats et les plus sensibles. L'absence de laitier fournit des assemblages très propres et exempts d'inclusions non métalliques. En revanche, une excellente propreté des préparations s'impose et l'absence de scorifiant est souvent gênante, le gaz inerte de protection n'ayant aucun pouvoir décapant ou désoxydant.

La faible tension de soudage de l'arc T.I.G. oriente le procédé vers l'exécution de travaux délicats, soit manuels, soit automatiques, sur pièces minces et vers le soudage en toutes positions. Un appareil automatique avec torche puissante refroidie à l'eau permet le soudage à plat pénétrant. L'emploi de l'hélium élève la tension d'arc et favorise la pénétration.

En soudage T.I.G. à fil chaud, on accélère l'apport de métal en facilitant sa fusion par passage d'un courant dans le fil d'apport. Ce mode de soudage peut notamment être appliqué à des travaux automatiques de rechargement.

En soudage pénétrant de métaux et alliages lourds de toute espèce, la protection d'argon qui est réalisée en sur-

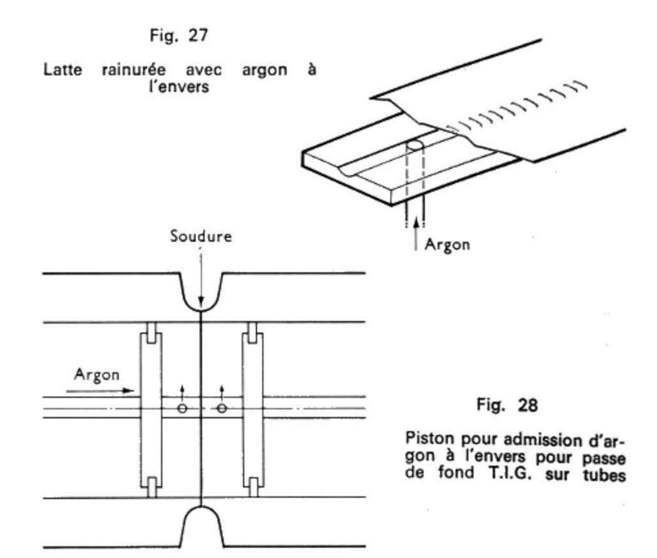


Fig. 27

Latte rainurée avec argon à l'envers

Fig. 28

Piston pour admission d'argon à l'envers pour passe de fond T.I.G. sur tubes

face du bain n'est pas assurée à l'envers de la soudure, aussi faut-il prévoir un soudage sur latte rainurée avec renvoi d'argon à l'envers (fig. 27). Pour des canalisations, un dispositif à double diaphragme permet de créer une chambre d'argon à l'envers de la soudure de raboutage (fig. 28). Les soudures sur petits récipients sont faites après emplissage d'argon; par économie, pour des capacités plus importantes on peut substituer de l'azote à l'argon.

Le soudage T.I.G. permettant d'atteindre une excellente qualité de pénétration, certains assemblages épais, sans reprise à l'envers possible (tuyauteries), préparés en tulipe, sont exécutés avec passe de fond T.I.G. et le remplissage est ensuite fait par un procédé plus rapide (électrodes enrobées, fil fourré ou M.I.G., etc.).

L'absence d'action désoxydante du gaz inerte fait que le soudage des aciers ordinaires non calmés n'est pas recommandable (risque de soufflures).

En soudage d'acier inoxydable, une meilleure productivité et une réduction des scories sont atteintes en admettant dans la torche un mélange de l'argon et 5 % d'hydrogène.

En soudage du cuivre, l'emploi d'argon est habituel mais certains préfèrent l'hélium ou même l'azote. Pour être soudable le cuivre doit être *désoxydulé*; cependant sa haute conductivité l'expose à l'oxydation hors de la zone protégée par l'argon, fragilisant ainsi les soudures multipasses. Une extension de protection endroit et envers sous un bain d'azote est souhaitable.

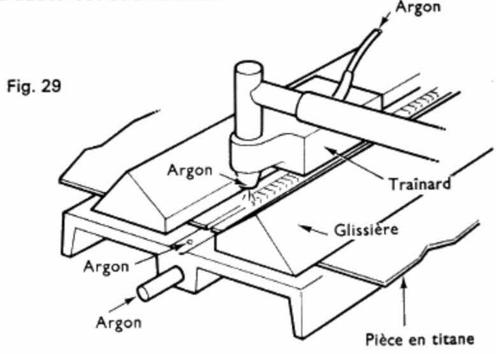


Fig. 29

Protection inférieure et supérieure par trainard pour soudage T.I.G. du titane

Le soudage de métaux tels que titane, tantale, zirconium, etc., altérables à chaud par l'oxygène, l'hydrogène ou l'azote, exige l'utilisation d'argon extrêmement pur (99,995 %), et l'emploi de traînards coulissants pour des soudures rectilignes (fig. 29), tandis que l'exécution de soudures complexes a lieu sous boîte à gants rigide ou souple en milieu d'argon pur, extrêmement sec (fig. 30).

Le soudage d'aluminium ou de magnésium nécessite moins de précaution du fait de la protection naturelle du

Fig. 30 — Boîte à gant souple pour soudage en atmosphère inerte. En avant, pompe à vide déconnectable (*S.A.F.*)

matériau par son oxyde réfractaire et par suite de l'action dispersive du courant alternatif de soudage. On évite néanmoins les préparations à angles vifs saillants à l'envers qui ne seraient pas décapés par émission électronique.

3.4.5. Soudage M.I.G. (symbole international pour *metal inert gas*). — Un fil-électrode en bobine est déroulé automatiquement (fig. 31), à vitesse constante, à travers

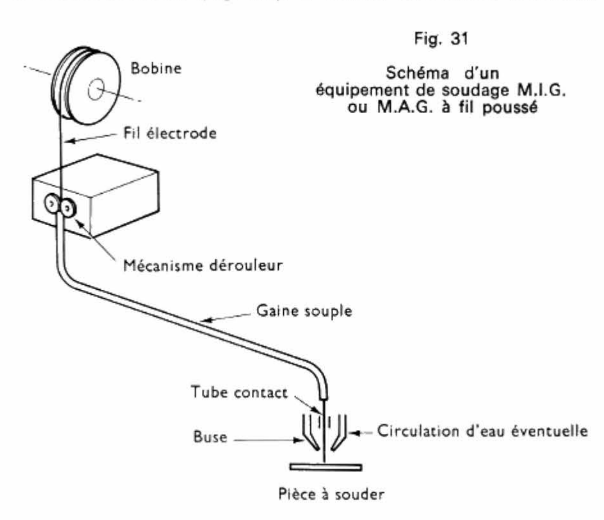


Fig. 31

Schéma d'un équipement de soudage M.I.G. ou M.A.G. à fil poussé

une gaine souple. Dans la torche à souder (fig. 32), il est mis en contact avec un tube guide-fil en cuivre, relié au pôle positif d'un générateur continu de soudage. Le fil débouche dans une buse amenant le gaz inerte.

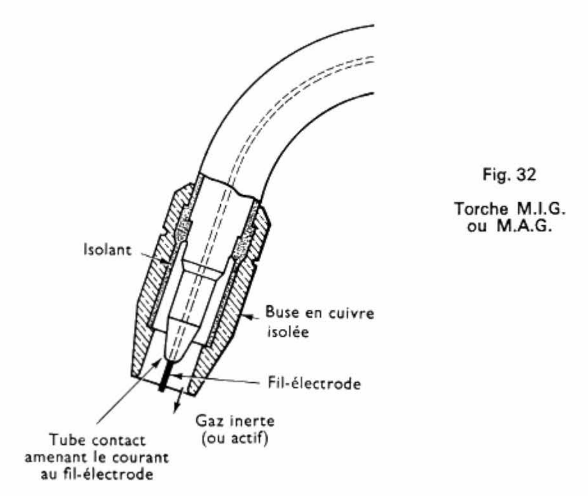


Fig. 32

Torche M.I.G. ou M.A.G.

Ce gaz est de l'argon ou un mélange d'argon et de 30 % d'hélium au maximum, (jamais d'hélium pur). N'ayant pas, comme en soudage T.I.G., à protéger l'électrode de la détérioration, pour les aciers on admet un mélange d'argon et de 1 à 5 % d'oxygène ou de gaz carbonique qui procure au bain une turbulence favorable.

On distingue deux régimes :

— Pour une densité de courant élevée (plus de 260 A pour un fil de 1,2 mm de diamètre dans le cas de l'acier), il y a régime sur-critique : l'extrémité du fil fond en donnant lieu à un effilement du métal qui est pulvérisé en fines gouttelettes précipitées à grande vitesse vers la pièce par l'effet électromagnétique de « pincement ». C'est

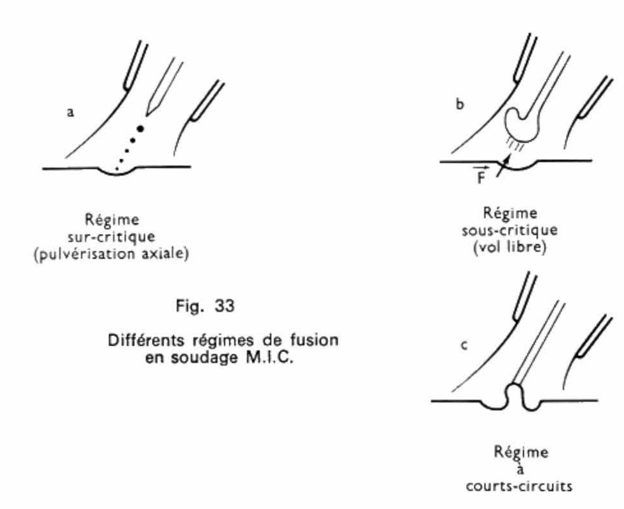


Fig. 33

Différents régimes de fusion en soudage M.I.C.

le transfert par pulvérisation axiale (fig. 33 a) avec attraction des gouttelettes vers la pièce.

— Pour une densité de courant moindre, la goutte, plus difficilement détachée du fil, va en grossissant. C'est le transfert par grosses gouttes (fig. 33 b) ; son volume croissant, avant de se détacher la goutte peut, dépasser la largeur de colonne d'arc. La vaporisation de l'extrémité libre de la goutte crée alors une force $\vec{F}$ de répulsion ; elle est alors déviée et peut être divisée en plusieurs gouttelettes : c'est le transfert en régime sous-critique, par grosses gouttes, en vol libre.

Pour tirer correctement parti de ce régime, il faut réduire la longueur d'arc au point que chaque goutte grossie établisse un court-circuit avec la pièce avant de s'être détachée du fil-électrode : c'est le transfert par court-circuit (fig. 33 c) en régime sous-critique.

Le régime normal d'utilisation du soudage M.I.G. est le régime sur-critique, par pulvérisation axiale, avec longueur d'arc de 5 à 7 mm.

Le régime sous-critique par courts-circuits en arc court est difficilement maintenu, sauf si l'on superpose un courant alternatif de 30 à 200 Hz au courant continu. La cadence de formation des gouttes est ainsi imposée : c'est le M.I.G. pulsé, à longueur d'arc très faible.

Le fil est déroulé à vitesse constante *V* choisie ; on appelle, sans doute à tort, soudage semi-automatique le cas où la torche est tenue à la main (il s'agit en fait de soudage manuel) et soudage automatique le cas où la torche liée à un chariot progresse mécaniquement par rapport à la pièce.

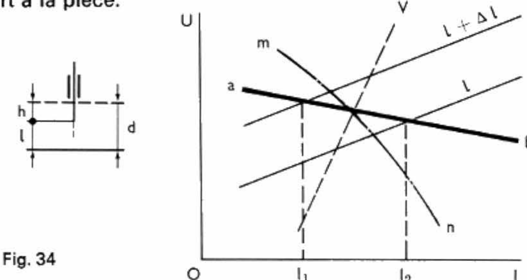


Fig. 34

Autorégulation de l'arc en soudage M.I.G. ou M.A.G.

Soit *d* la distance entre l'extrémité du tube contact et la pièce (fig. 34) : $d = h + l$, l étant la longueur d'arc. Les droites inclinées l et $l + \Delta l$ sont les caractéristiques des arcs de longueur l et $l + \Delta l$ en régime établi tandis que *ab* est une caractéristique plate et *mn* une caractéristique tombante d'appareil de soudage ordinaire. On voit que, dans le cas d'un appareil à caractéristique plate, la variation de longueur d'arc Δl se traduit par une variation $I_1 — I_2$ importante de l'intensité du courant avec pour conséquence un rétablissement rapide de la longueur normale d'arc par variation de régime de fusion du fil : il y a autorégulation. Ce n'est pas le cas de la caractéristique tombante *mn* qui risquerait de provoquer soit l'extinction avec collage du fil par court-circuit, soit rentrée d'arc avec détérioration du tube contact de la torche. C'est pourquoi en soudage M.I.G. on choisit un appareil de soudage à caractéristique plate peu tombante qui assure en outre un amorçage instantané de l'arc. Il existe des appareils M.I.G. soit à transformateur-redresseur, soit à génératrice tournante. La caractéristique externe plate est soit à pente prédéterminée (4 à 5 V par 100 A), soit à pente réglable. La tension à vide est de 14 à 22 V pour un arc court (sous-critique) et 20 à 44 V pour un arc long (sur-critique).

Les fils-électrodes pour soudage ont les diamètres suivants : 0,5 — 0,6 — 0,8 — 1,0 — 1,2 — 1,6 mm pour les métaux lourds et 0,8 — 0,9 — 1,2 — 1,6 — 2,0 et 2,4 mm pour les métaux légers. Une très grande pureté et un parfait état de surface sont nécessaires à un bon transfert dans l'arc. Les fils sont tréfilés sans lubrifiant pour éviter toute contamination (certains fils d'aluminium subissent même un pelage). Ils sont enroulés en bobines de 5 à 10 kg, en sachet étanche, avec déshydratant, que l'on n'ouvre qu'au moment de l'emploi.

Les torches courbes classiques pour arc court ne sont utilisables qu'avec des courants ne dépassant pas 200 A.

Les torches et pistolets pour des courants de plus de 300 A sont à refroidissement par eau ou par air.

Les appareils à fil poussé par un dérouleur près de la bobine (V. fig. 31) n'admettent pas de fil de moins de 0,9 mm pour l'acier et 1,6 mm pour l'aluminium. La gaine souple allant à la torche ne dépasse pas 5 m de long. Les appareils à fil tiré ou poussé-tiré, avec galets moteurs incorporés à la torche, acceptent des fils fins et des gaines de plus grande longueur.

Des pistolets à fil fin à bobine incorporée ont une autonomie suffisante pour des travaux de pointage ou de retouche.

Le régime M.I.G. à arc long ne convient pas au soudage de pièces de moins de 3 mm d'épaisseur. On peut souder l'aluminium en toutes positions (fig. 35) tandis que pour les métaux lourds on préfère le soudage à plat.

Le régime à arc court (M.I.G. pulsé) utilise du fil fin ; il convient aux pièces minces et s'applique en toutes positions. Sous ce régime il y a risque de collage (il faut contrôler attentivement les réglages et faire des essais de pliage d'éprouvettes).

3.4.6. Soudage M.A.G. (symbole international pour *metal active gas*). — C'est en fait une variante du soudage M.I.G. adaptée à l'acier et utilisant l'appareillage M.I.G. Avec un mélange argon-gaz carbonique (plus de 15 % de CO_2) on constate que, même en fusion sous forte densité de courant, le régime sur-critique disparaît, la fusion se faisant toujours avec formation de grosses gouttes (V. fig. 33 c). C'est le soudage M.A.G.

En fait, trois types de gaz sont utilisés, débités à raison de 12 à 18 l/mn :

— mélange riche environ 70 % d'argon et 30 % de gaz carbonique ;

— mélange pauvre : environ 30 % d'argon et 70 % de gaz carbonique ;

— gaz carbonique pur (point de rosée — 40 °C).

Sous la haute température de l'arc, le gaz carbonique est décomposé en oxyde de carbone et oxygène : le milieu gazeux est donc oxydant. Il convient néanmoins au soudage des aciers de construction, la composition du fil tenant compte des pertes par une teneur accrue en silicium et manganèse, et s'il y a lieu par addition d'aluminium et de titane. Grâce à cette action désoxydante et à la turbulence du bain, le soudage M.A.G. est moins exigeant que le M.I.G. en ce qui concerne la propreté et l'absence d'oxyde des préparations. On rejoint par là les facilités du soudage avec électrodes enrobées. Les fils pour gaz carbonique pur sont davantage chargés en désoxydant que les fils pour souder en mélange gazeux riche.

On distingue deux régimes de soudage M.A.G. :

— Soudage à arc long, sous 30 à 35 V, fil ; ⌀ 1,2 à 1,6 mm débité à 5 à 10 m/mn avec un courant de 300 à 400 A. La pénétration de la fusion est profonde. Il convient en soudage automatique à plat.

— Soudage automatique ou manuel sous 15 à 20 V, fil : ⌀ 0,6-0,8 ou 1 mm débité de 2 à 5 m/mn, avec un courant

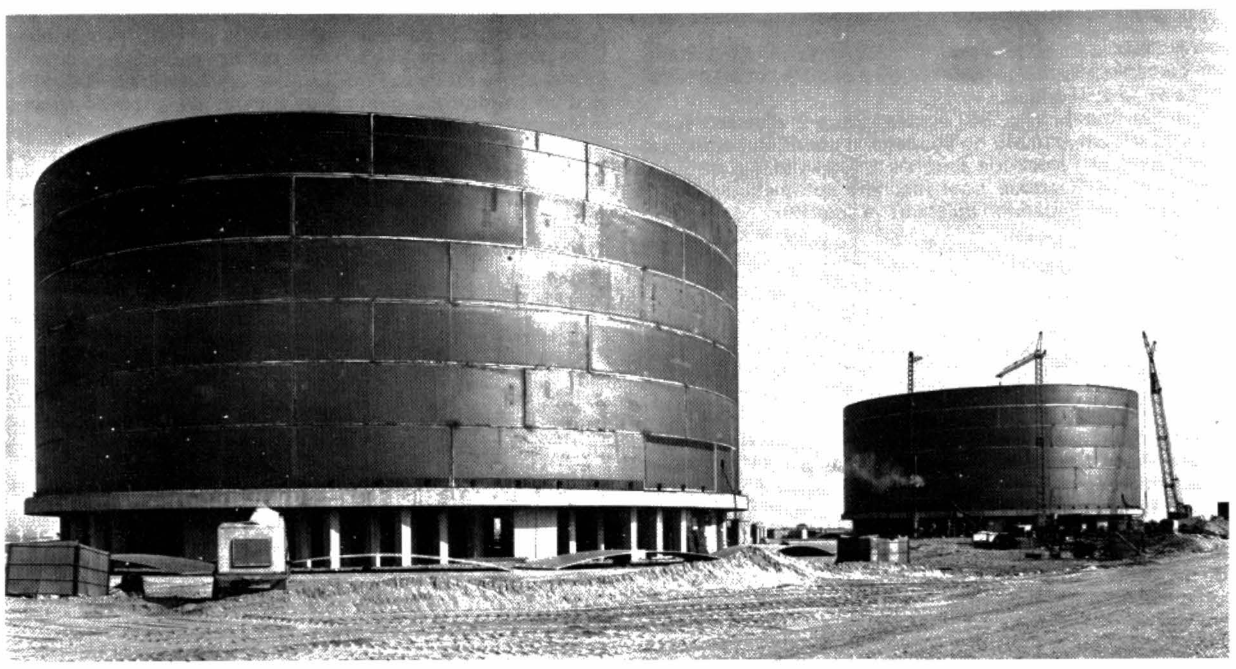


Fig. 35 — Réservoirs de 35 000 m^3 construits à Fos-sur-Mer pour le stockage de gaz naturel liquéfié. Les cuves intérieures en alliage d'aluminium (A.G.4.M.C.) d'épaisseur 10 à 39 mm, ont été réalisées sur chantier par soudage M.I.G. automatique (*Constructions métalliques de Provence*)



Fig. 36 — Soudage M.A.G. automatique multipasse, en position plafond, d'une sphère à pression en acier à haute limite d'élasticité de 25 mm d'épaisseur (*Tissot*)



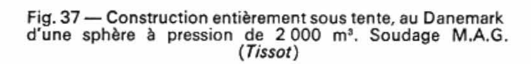


Fig. 37 — Construction entièrement sous tente, au Danemark d'une sphère à pression de 2 000 m^3. Soudage M.A.G. (*Tissot*)

de 40 à 200 A. L'arc est très court (2 mm sous CO_2, 3 à 4 mm sous mélange). On peut souder en toutes positions et descendre à de faibles épaisseurs (jusqu'à 0,4 mm sous mélange riche). Le bain se creuse, réduisant d'autant les projections. On agit sur le temps de court-circuit et par là sur la fréquence des gouttes (30 à 150 par seconde) au moyen d'une inductance réglable spécialement introduite dans le circuit : une faible inductance augmente la fréquence. La vitesse de déroulement du fil agit encore sur la répartition des énergies dans l'arc, un fil exagérément sorti empruntant une chaleur excessive par effet Joule.

La technique M.A.G. en arc court est très appréciée en soudage courant sur acier par sa facilité et sa rapidité d'emploi. Un mauvais réglage entraîne une fusion excessive de fil sans que l'énergie apportée à la pièce soit en rapport et elle détermine des collages (particulièrement sur la tôle inférieure, en soudure d'angle à plat). On contrôle fréquemment les réglages par des essais de pliage sur coupon témoin. Le bruit des crachements excessifs de l'arc informe l'opérateur de déréglages éventuels. En cas de soudage avec courant redressé, un régulateur de tension du réseau peut être nécessaire (transducteur autosaturable).

En raison de sa commodité d'adaptation, le soudage automatique M.A.G. s'est beaucoup développé soit en fabrication de série de petites pièces d'acier de toute espèce, concurrençant souvent le soudage électrique par résistance, soit dans l'utilisation de bancs automatiques remplaçant le travail manuel en soudage à plat (concurrençant alors le soudage sous flux en poudre), soit encore dans la création d'automates portatifs de soudage de chantier (fig. 36), la protection contre le vent devant, dans ce cas, être soigneusement assurée (fig. 37).

3.4.7. Soudage avec fil fourré. — Les fils fourrés sont des fils faits d'un tube ou d'un feuillard replié comportant une certaine quantité de flux (entre 15 et 50 %) et étiré sous forme de fil cylindrique.

Les fils fourrés (fig. 38) sont apparus à diverses époques du développement du soudage, d'abord en baguettes concurrençant l'électrode enrobée pour soudage manuel, ensuite en fil-électrode pour machine automatique à arc ordinaire avant apparition du soudage sous flux.

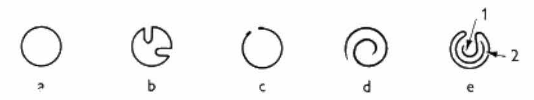


Fig. 38 — Différents types de fils fourrés
1. Élément d'alliage; 2. Élément d'enrobage

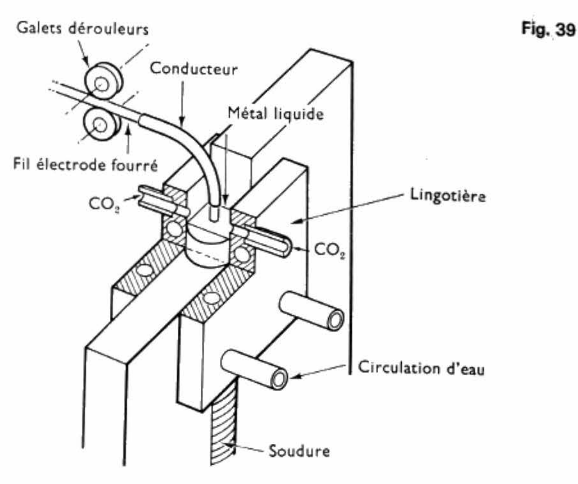
Ils sont réapparus plus récemment en fils-électrodes, bénéficiant des perfectionnements acquis par les procédés de soudage sous gaz, pour trois emplois: fil fourré sous gaz, fil fourré dans l'air, fil pour soudage vertical soutenu sous gaz. Le fil (fig. 38 e), séparant les éléments d'alliage (1) des éléments habituels d'enrobage (2), constitue un perfectionnement. Dans les trois cas, on opère sous courant continu, l'électrode étant positive, comme en soudage M.A.G.

1° *Fil fourré sous gaz.* — Le fil fournit un laitier qui peut être rutile, acide ou basique, il peut contenir, en outre, des éléments d'alliage permettant de déposer des aciers faiblement alliés et même des aciers inoxydables austénitiques ou des fontes synthétiques. L'avantage de ce fil est de permettre de déposer un métal à caractéristiques améliorées et, partant toujours d'un feuillard d'acier doux, de fournir des dépôts aux compositions les plus variées. Ses inconvénients sont d'être d'un déroulement moins souple et de nécessiter le piquage du laitier entre passes. De plus, le fil fourré est relativement coûteux.

2° *Fil fourré dans l'air.* — Un flux cellulosique et un feuillard suffisamment carburé peuvent dégager une atmosphère de gaz carbonique protégeant de l'air ambiant et permettant de déposer un métal de performances intéressantes. Ce fil est très apprécié pour des travaux en chantier mal abrité du vent. Pour l'atelier, la torche peut être munie d'un conduit d'aspiration de fumées. Ce procédé accepte des préparations à chanfrein moins ouvert.

3° *Fil pour soudage vertical soutenu sous gaz* (fig. 39). — Il permet le soudage vertical sous laitier limité à des épaisseurs de 12 à 40 mm. L'arc n'est pas étouffé

Fig. 39



mais il jaillit au-dessus du bain, sous atmosphère de gaz carbonique, le fil-électrode fourré fournissant le flux nécessaire. Ce flux joue le rôle améliorant souhaité car la forme donnée aux lingotières de soutien assure son élimination et évite toute accumulation excessive.

On opère soit sur bords droits écartés de 15 à 17 mm (comme en soudage sous laitier), soit sur bords chanfreinés Le courant peut atteindre 500 A avec un fil de 2 à 3 mm de diamètre. Ce procédé, plus souple que le soudage sous laitier, s'adapte à des joints inclinés sur la verticale. Il s'applique à la construction navale et au montage de réservoirs (fig. 40).

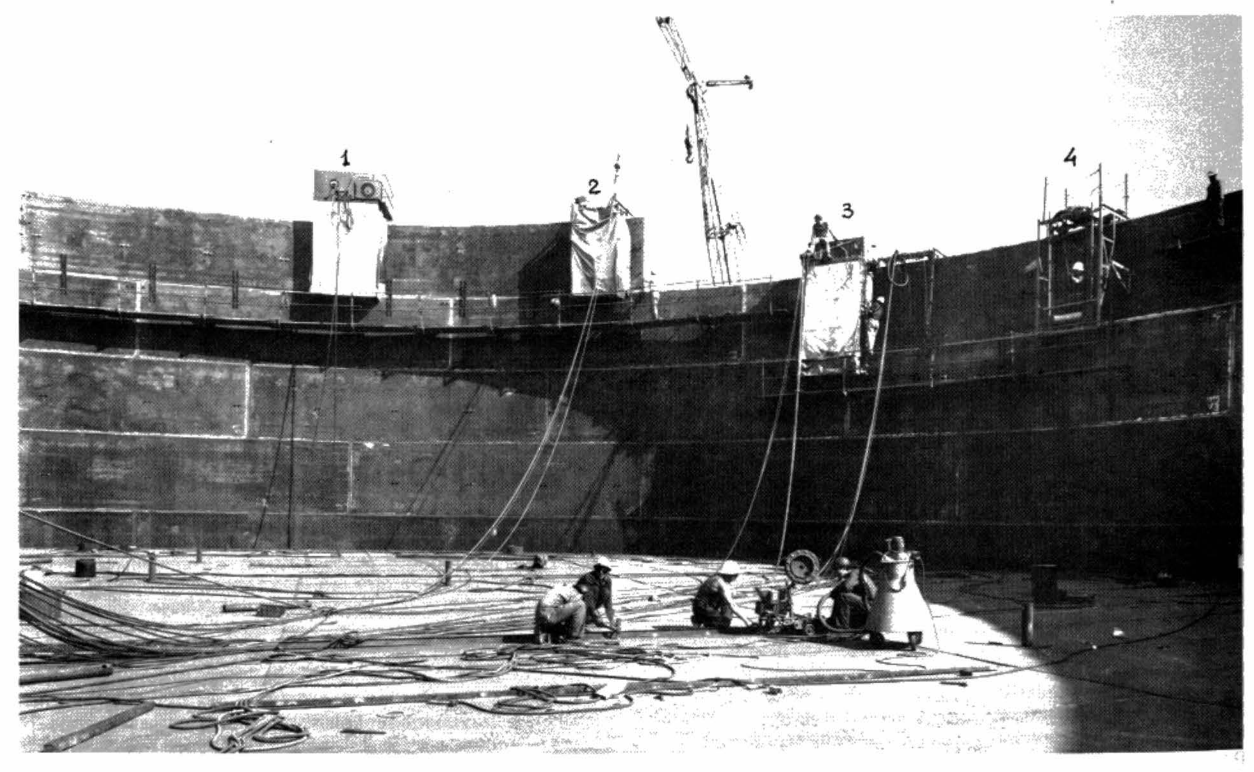


Fig. 40 — Vue intérieure d'un réservoir de stockage en cours de montage — 1. Sous bâche: soudage automatique vertical sous gaz. — 2. Sous bâche: reprises arc-air et parachèvement en soudage manuel M.A.G. — 3. Sous bâche: soudage en corniche automatique sous flux en poudre. — 4. Nacelle de contrôle radiographique. Au sol, soudage sous flux en poudre de tôles de fond (*Constructions métalliques de Provence*)

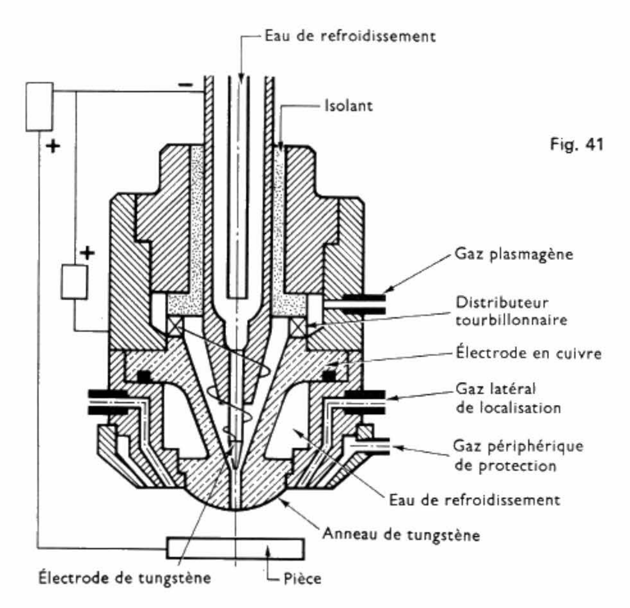


Fig. 41

Torche de soudage plasma à arc transféré

Il convient à des assemblages plus minces que ce qui est usuel en soudage sous laitier. Cependant, comme il est réalisé en une seule passe, il fournit lui aussi des soudures à structure grossière.

3.4.8. Soudage plasma. — Les plasmas sont des gaz ou vapeurs électriquement neutres, rendus conducteurs par un taux élevé d'ionisation. L'arc de soudage ordinaire est un plasma à faible taux d'ionisation.

La torche à hydrogène atomique, imaginée par Langmuir en 1925, produit la dissociation de l'hydrogène à la chaleur de l'arc ; ce dispositif a constitué la première torche plasma de soudage à l'air libre. Le procédé est encore utilisé lorsqu'on veut réaliser des soudures en milieu réducteur plus actif que ne le sont les gaz inertes du soudage M.I.G. Les torches à forte concentration de plasma procèdent par confination de l'arc ; leur mise au point fut longue. Les premières applications ont concerné la projection thermique, puis le coupage thermique (V. t. 3, Découpage, § 2),

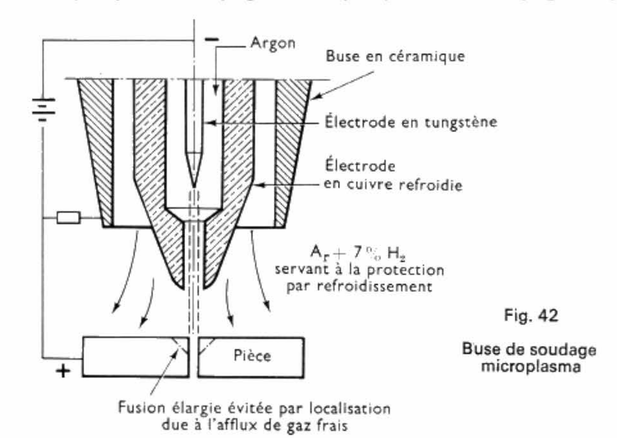


Fig. 42

Buse de soudage microplasma

puis le soudage microplasma. Le soudage plasma normal est très récent.

Un arc à courant continu jaillit entre une électrode négative en tungstène et une anode annulaire suivie d'un canal étroit de sortie, le tout en cuivre énergiquement refroidi. Le gaz, un mélange argon-hydrogène (5 à 10 %), très dilaté à haute température, refroidi à sa périphérie par la paroi, laminé par pincement électromagnétique, sort à l'état de plasma entre 8 000 et 20 000 °C. C'est la torche à plasma à arc soufflé (ou non transféré) utilisée en projection thermique (fig. 41). Pour le soudage ou le coupage thermique, la torche est dite à arc transféré, une partie de l'arc jaillissant entre la buse de la tuyère de la torche et la pièce mise en œuvre. L'appareil de soudage est à courant continu ; la tension de fonctionnement est de 40 V en microplasma et de 50 V en soudage plasma normal.

Le microplasma (fig. 42) convient au soudage rapide en une seule passe, par fusion étroite, de pièces de 0,1 à 1,5 mm d'épaisseur, en acier inoxydable ou métaux et alliages nobles (exemple : fabrication de petits tubes).

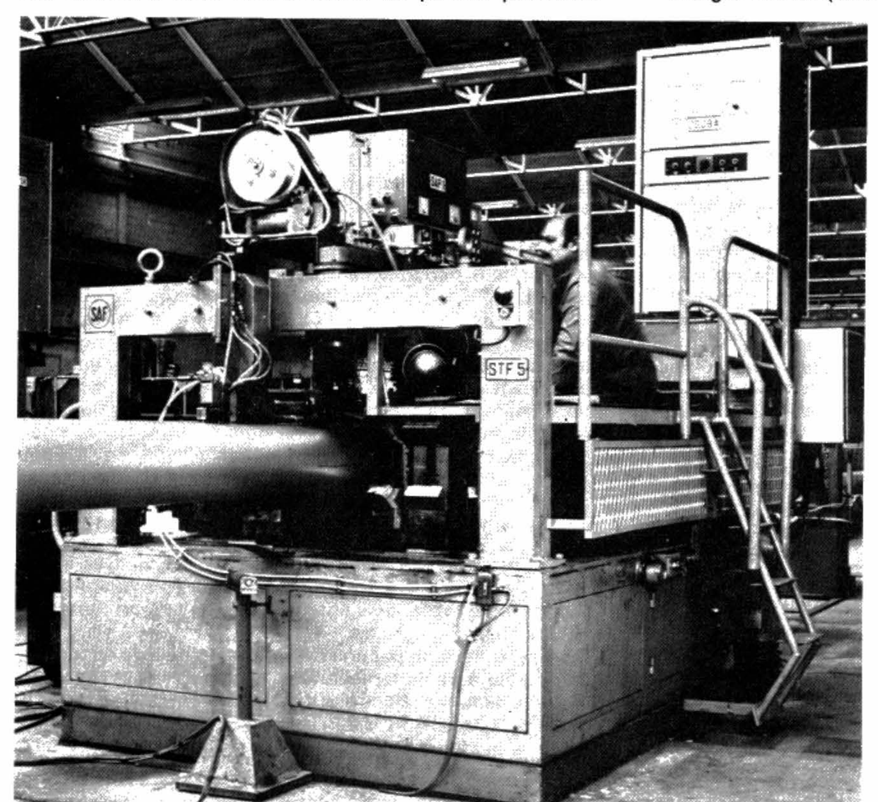


Fig. 43

Soudage automatique plasma continu : fabrication de tubes en acier inoxydable (*S.A.F.*)

Le plasma convient bien au soudage bout à bout en une seule passe, sur bords droits, de pièces de 3 à 10 mm d'épaisseur (fig. 43), par formation d'un trou développé de proche en proche (analogie avec le soudage par faisceau d'électrons). Sur pièce plus épaisse, le soudage plasma ne s'applique actuellement qu'à la passe de fond sur préparation en tulipe avec méplat épais. Le remplissage est réalisé, de préférence, par l'un des autres procédés déjà décrits (M.I.G., M.A.G., électrodes enrobées, etc.).

Le soudage plasma est moins bien adapté aux métaux très conducteurs (aluminium et cuivre), le cas de l'aluminium étant aggravé par la présence d'alumine.

3.4.9. Formes particulières de soudage local à l'arc. — Deux formes particulières de soudage local à l'arc sont à envisager: le soudage par points et le soudage des goujons, la localisation de la chaleur ayant un effet trempant, un préchauffage peut être nécessaire pour éviter un risque de fissuration.

1° *Soudage par points à l'arc.* — Ce procédé se substitue au soudage par points par résistance électrique si l'on ne peut accéder qu'à une face de l'assemblage ou s'il y a impossibilité de mise en place des électrodes, encombrement ou manutention excessifs des pièces. Selon les cas, on peut opérer en technique T.I.G., M.I.G. ou M.A.G.

La commande du cycle « passage de gaz - soudage - arrêt du gaz » est automatique. Le soudage très bref se limite au temps nécessaire à la pénétration de la fusion et à la formation du point. L'atmosphère protectrice évite la formation d'un cratère. L'électrode étant immobile, la buse qui comporte des évents prend généralement appui sur la pièce en recouvrement, assurant ainsi un meilleur contact des éléments à assembler.

Le soudage T.I.G. (fig. 44) convient aux faibles épaisseurs (0,2 à 0,3 mm) et spécialement aux métaux et alliages délicats: inoxydables, réfractaires, cuivre, etc. (pour l'aluminium et le magnésium, on adopte le courant continu, l'électrode étant négative). On soude sans métal d'apport. Les temps de soudage sont de quelques secondes; la commande automatique est aisée (travaux de grande série).

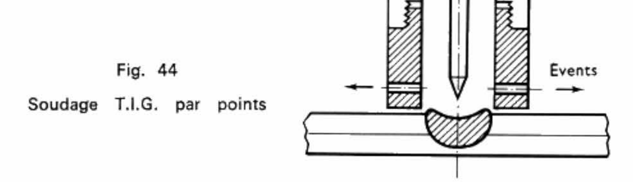


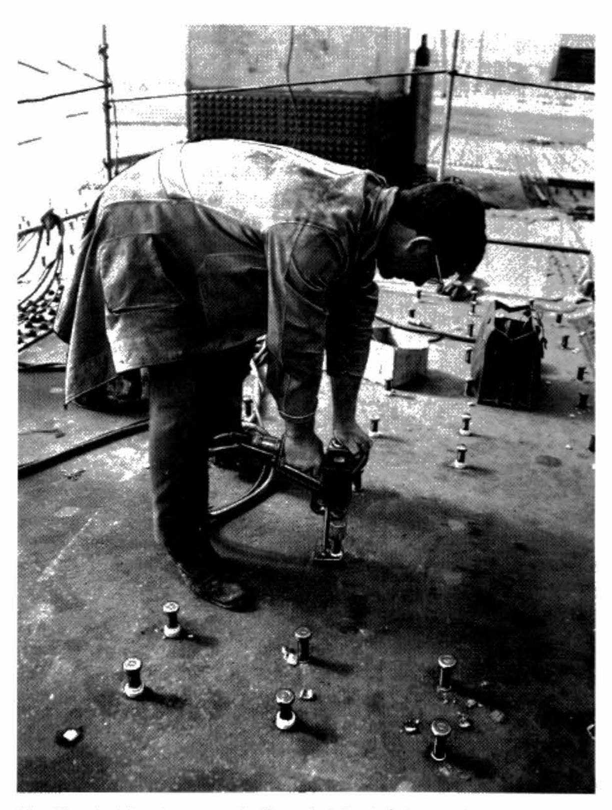
Fig. 44
Soudage T.I.G. par points

Le soudage M.I.G. s'emploie pour des épaisseurs de 0,8 à 10 mm; il y a intérêt à ce que la tôle inférieure soit plus épaisse que l'autre. Au-dessus de 3 mm, on a avantage à percer la tôle supérieure à l'avance (soudage en bouchon), la résistance du point en est augmentée. Le diamètre du fil est de 0,8 à 2,4 mm suivant épaisseur. On évite les crachements en soudant avec un fil-électrode positif. Le soudage est moins rapide qu'en T.I.G. et l'aspect est moins régulier.

La technique M.A.G. est applicable aux aciers de construction.

2° *Soudage des goujons.* — Par soudage à l'arc et sans préparation particulière de surface, on fixe directement sur des pièces des tiges perpendiculaires telles que goujons filetés, tiges lisses ou crantées, clips, crochets, etc. L'élément à souder est pris dans un pistolet spécial relié par commande automatique à une source appropriée de courant de soudage et on l'appuie sur la pièce à l'emplacement désiré. En soudage ordinaire, le goujon a 6 à 30 mm de diamètre; on utilise un courant continu de 400 à 3 000 A, et le soudage dure de 0,25 à 2 s. À son extrémité à souder, le goujon peut comporter une capsule d'amorçage. Généralement, une ferrule réfractaire enserre le métal fondu. On soude en toute position. Sous argon, on pose des goujons d'aluminium sur de l'aluminium.

Le procédé s'applique en construction mécanique ou électrique; il évite de percer et de tarauder la pièce. En construction mixte acier-béton, le tapissage par goujons de la surface de l'ouvrage assure la solidarisation de la dalle de béton (fig. 45). Un tapissage de tiges convient aussi à certains échangeurs de chaleur.


Fig. 45 — Tablier de pont métallique à dalle de béton — Pose de connecteurs, goujons de 22 mm de diamètre et 7 cm de hauteur (*S.N.C.F.*).

De petits goujons de 3 à 6 mm de diamètre en acier, laiton ou cuivre, posés par décharge de condensateur, servent à fixer le calorifugeage ou l'isolation de parois de voitures, navires, conduits de ventilation, etc.

3.4.10. Soudage à l'arc sous l'eau. — Le développement des travaux maritimes ou fluviaux a rendu nécessaire la mise au point de techniques de soudage sous l'eau.

On soude dans l'eau, soit avec électrodes enrobées (seul l'enrobage oxydant convient), électrode et pince étant spécialement isolées, soit avec torche à déroulement de fil. Du fait de l'absence de visibilité (turbulence gazeuse) et de l'humidité du milieu, la soudure est de qualité médiocre. La position plafond est impossible.

On préfère généralement souder hors eau en utilisant une torche T.I.G.; les résultats sont meilleurs. Le soudeur est soit dans l'eau (utilisation d'une boîte à gants), soit dans une enceinte hors eau (analogie avec une cloche à plongeur). Si le soudeur en respire l'atmosphère gazeuse (ce qui est déconseillé — emploi d'un scaphandre individuel) celle-ci doit être maintenue pure et réglée avec précision en fonction de la profondeur d'immersion. Pour de grandes profondeurs, une teneur élevée en hélium s'impose et la torche doit fonctionner sous hélium.

Sous forte pression gazeuse, l'arc est raccourci et dégage plus d'énergie.

3.5. Soudage par faisceau d'électrons. — Dès 1956, Stohr réalisa au C.É.A. les premières applications au soudage sous vide de l'énergie fournie par un faisceau d'électrons.

Les électrons émis par une cathode en tantale ou en tungstène, portée à haute température, sont projetés et focalisés par un « canon à électrons » fonctionnant sous un vide proche de 10^{-3} torr (1 torr = $7{,}5 . 10^{-5}$ N/m²).

Deux types de canons sont utilisés concurremment:

— le *canon Pierce* (fig. 46) qui recourt à un champ électrique puissant créé entre électrodes aux formes

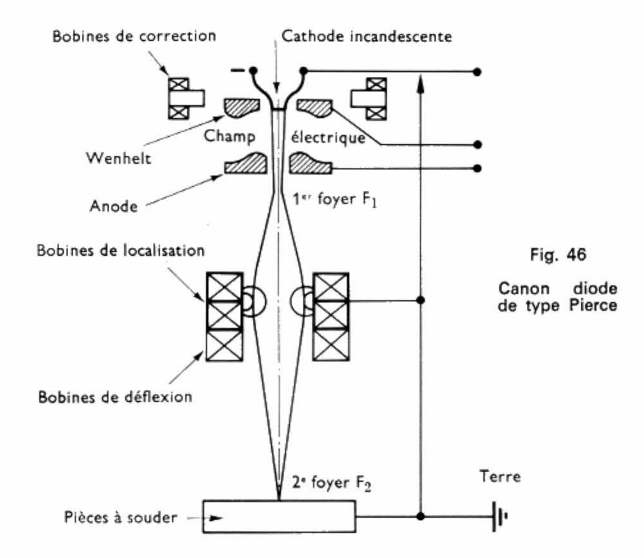


Fig. 46

Canon diode de type Pierce

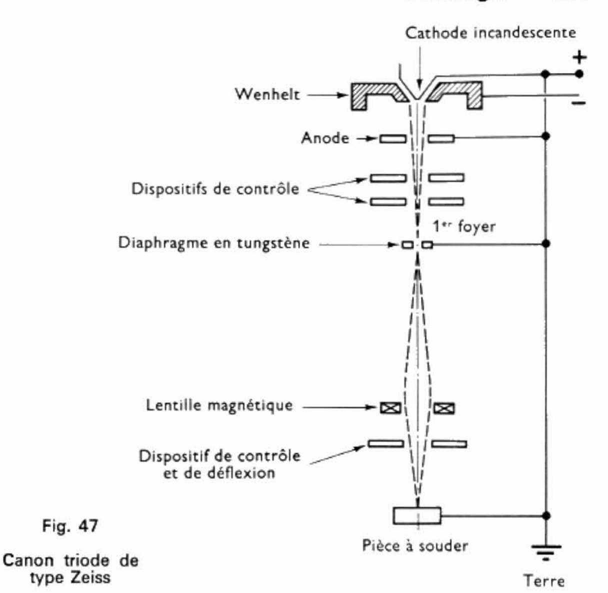


Fig. 47

Canon triode de type Zeiss

appropriées. Fonctionnant sous tension relativement modérée, il n'exige pas de protection importante vis-à-vis du rayonnement X émis ;

— le *canon Zeiss* (fig. 47), conçu comme une colonne de microscope électronique, il fonctionne sous une tension plus grande et exige plus de précautions. Le faisceau obtenu est plus ponctuel.

La soudure par faisceau d'électrons est caractérisée par une grande vitesse d'exécution et par une très faible largeur de zone fondue (0,5 à 4 mm), eu égard à la profondeur de pénétration qui dépend de la tension d'accélération, de l'énergie d'émission et de la nature du métal. Avec les canons les plus puissants la pénétration atteint, par exemple, 60 mm avec l'acier inoxydable et 80 mm avec l'aluminium ; une épaisseur double peut donc être soudée en opérant sur deux faces (présence d'un défaut central).

La faible largeur de la zone fondue impose une préparation à bords droits rigoureusement jointive ainsi qu'une conduite automatique précise et rapide du canon. L'effet de trempe est accusé. La faible valeur des retraits obtenue (1/10 mm) est acceptable en fabrication mécanique sur pièces préusinées.

Le métal instantanément fondu ou volatilisé localement, s'efface vers l'arrière sous la violence des chocs et du fait de l'avance du faisceau. Il se forme un trou qui, en s'enfonçant et en progressant, assure derrière lui la liaison par rebouchage.

C'est l'unique procédé qui, par traversée de plusieurs parois distinctes, permet d'obtenir en un seul parcours leur liaison simultanée, réalisant ainsi les assemblages les plus étonnants.

La figure 48 donne une idée de la diversité d'application du procédé. Sous le vide extrême nécessaire à l'émission cathodique, la zone fondue est mieux protégée de toute contamination qu'en soudage M.I.G. sous gaz même très épuré. Aussi, ce procédé est-il indiqué pour souder les métaux les plus sensibles, tels que l'uranium, le zirconium, le titane, le tantale, le niobium, le tungstène, l'aluminium, etc.

Son emploi est très développé, par exemple, pour le gainage des combustibles nucléaires. Des métaux facilement volatils, tels que le zinc, le cadmium ou le magnésium exigent un puissant pompage de la cabine. Des alliages

Fig. 48 — Quelques exemples de pièces soudées par faisceau d'électrons se rapportant à la construction mécanique (*d'après document Sciaky*)

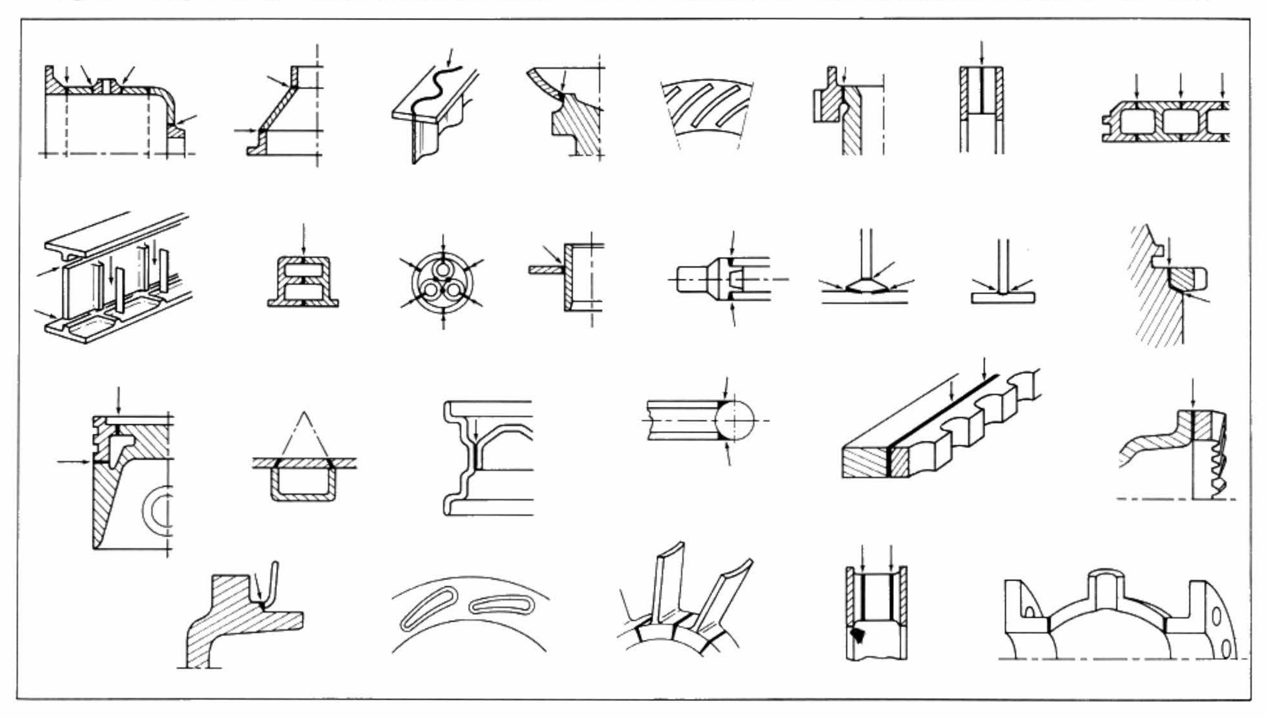




Fig. 49 — Machine de 30 kW avec cabine de 44 m^3 pour construction de longeron central, pivot en titane, pour avions à géométrie variable (*Sciaky*)

Fig. 50 — Machine à souder par faisceau d'électrons sous vide partiel pour engrenages de boîte de vitesses de voitures. Dispositif à deux canons à plateau tournant, soudant les anneaux de synchronisation sur pignons fous des 1re, 2e, 3e et 4e vitesses à la cadence de 10 pièces par minute (*Sciaky*)

dégageant beaucoup sous vide (fonte) ne sont pas soudables par ce procédé (cassage du vide).

Certains assemblages hétérogènes donnant lieu à la formation de composés fragiles dans un soudage par fusion habituel, sont réalisables par soudage avec faisceau d'électrons, grâce à l'étroitesse du joint réalisé (par exemple : liaison fer-cuivre). L'aptitude du faisceau d'électrons à être dévié par un champ électrique ou magnétique est utilisée pour le diriger à volonté à l'intérieur de la chambre de soudage. On peut ainsi élargir le joint (faisceau vibrant) ou exécuter d'un seul mouvement deux assemblages parallèles par sauts successifs. En défocalisant le faisceau on peut l'utiliser comme mode de préchauffage des bords à assembler. En contrepartie, l'aimantation d'une pièce peut, par déviation du faisceau, compromettre son soudage.

Malgré la perte par volatilisation et malgré l'absence de métal d'apport on observe une légère surépaisseur sur les deux faces du joint car celui-ci se contracte au retrait et le métal fondu se trouve comprimé. Grâce à cette contraction, et en utilisant un faisceau vibrant, on a pu souder sur préparation présentant jusqu'à 1 mm de jeu et obtenir sur fusion élargie une soudure sans manque de métal, ce qui ouvre la voie aux applications du procédé à des réalisations chaudronnées.

Un temps important est nécessaire pour obtenir un vide poussé dans la chambre de soudage, surtout si cette chambre est vaste (cas de pièces volumineuses ; fig. 49). On réduit beaucoup ce temps mort en ne faisant communiquer le canon avec la chambre que par un canal étroit ouvert seulement le temps nécessaire et en limitant à 10^{-3} torr le vide de cette chambre tandis que le canon est maintenu à 10^{-5} torr (fig. 50).

On peut utiliser le soudage par faisceau d'électrons à la réalisation de grands ensembles chaudronnés. À cette fin, une chambre à vide de dimensions limitées, faite de demi-coquilles enserrant localement la partie à assembler, est utilisée. Les temps importants de préparation rendent cette application coûteuse. Cependant, certains avantages, tels que la quasi-absence de déformation, la qualité du joint, la pureté de la liaison, peuvent justifier ce choix.

De nombreuses expériences ont été tentées, notamment pour la fabrication de tubes, pour souder par faisceau d'électrons hors vide, le canon à électrons débouchant au ras du joint à souder ; des difficultés sont encore rencontrées. On peut imaginer que le procédé prendra une place importante dans l'édification de futures constructions dans le vide stellaire.

3.6. Laser. — La simultanéité d'émission de photons rendue possible dans les lasers par le pompage optique (V. t. 2. Électrothermie) permet de concentrer une très forte énergie en des temps brefs dans un petit espace et ainsi de percer, graver, découper et souder des plaques minces (jusqu'à 1 mm) pour l'horlogerie et la micro-électronique.

Le rayonnement laser permet d'opérer soit en atmosphère libre soit derrière paroi transparente en atmosphère contrôlée ou dans le vide.

4. PROCÉDÉS EXIGEANT L'INTERVENTION D'UN EFFORT EXTÉRIEUR

Le cas de soudage par explosion mis à part, l'application d'un effort relativement important pour le soudage oblige à enserrer la région d'assemblage dans la gorge d'un équipement faisant fonction de presse. Cela impose de tenir compte de considérations géométriques et de la capacité du matériel, ce qui n'est pas utile avec les procédés de soudage par fusion.

4.1. Soudage à la forge. — Il s'applique au soudage du fer ou de l'acier. Les parties à assembler sont portées au *blanc soudant* sur un feu de forge ou au four. La liaison est obtenue par martelage ou par pression. Pratiqué dès l'âge du fer, le procédé a à peu près disparu en raison de la surchauffe, de l'oxydation subie par le matériau, de l'incommodité et de l'incertitude de qualité de l'exécution. Cependant, les procédés ci-après peuvent en constituer des variantes modernes très améliorées.

4.2. Soudage par refoulement, à la flamme oxyacétylénique. — Il s'agit de soudage bout à bout avec pression, les bords étant préalablement portés au blanc soudant par une flamme oxyacétylénique dont l'effet réducteur est favorable. Sur pièces minces, les bords sont présentés serrés et le chauffage est latéral. Sur pièces épaisses, les bords sont écartés, les flammes sont frontales et sont supprimées avant mise en pression. Le procédé est applicable à la rallonge de forets, au raboutage de tubes ainsi que de ronds à béton. La préparation à bords droits s'apparente à celle du soudage en bout par résistance électrique, par refoulement.

4.3. Soudage par colaminage ou cofilage. — Par laminage on peut assembler des demi-produits préalablement portés à la température de 1 100 à 1 200 °C. Appliqué autrefois à la récupération de vieux fers (soudage au paquet), le procédé est utilisé à présent à la fabrication d'aciers plaqués ; les aciers plaqués comportent une partie principale en acier de construction (support) protégée par un revêtement constitué, selon les cas, d'acier inoxydable, de nickel, de métal monel, etc. Pour être soudé, l'acier inoxydable doit être protégé de l'oxydation à chaud par une couche de fer ou de nickel électrolytique. L'acier plaqué est principalement utilisé à la fabrication de réservoirs ou de récipients à pression soudés.

On fabrique également par colaminage, à beaucoup plus basse température, des tôles d'alliages d'aluminium corrodables (A-U 4G) protégées sur leurs deux faces par une couche d'aluminium.

Le colaminage s'applique aussi à l'assemblage partiel de feuilles d'aluminium, des réserves d'encre imprimées s'opposant au soudage total (procédé *Roll Bond* appliqué à la fabrication d'échangeurs).

Par cofilage on peut également produire des profilés plaqués. Dans ce cas, on extrude des brames concentriques (fabrication de tubes plaqués).

4.4. Soudage par explosion. — Ce procédé (fig. 51) est d'application récente. Une tôle de revêtement, convenablement placée au-dessus du support qui lui est destiné et rigidement calée, se soude à ce dernier sous la déflagration provoquée par une charge explosive en feuille disposée à recouvrement. Les gaz évacués sous la violence du choc décapent les surfaces à unir. Les éléments mis en contact se plastifient, se lient, puis se figent en un joint ondulé reflétant le mouvement vibratoire (du jet de métal plastifié). Une telle opération, difficile à mener, est l'œuvre de spécialistes.

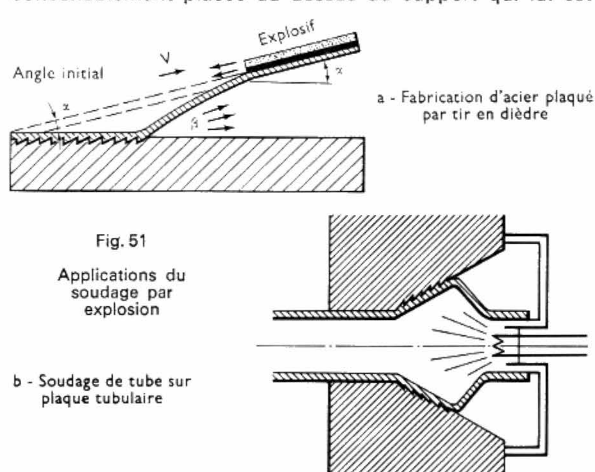


Fig. 51
Applications du soudage par explosion

Coûteux et délicat, le placage par explosion n'est utilisé que dans les cas suivants où le colaminage échoue :

— placage trop dur (par exemple : hastelloy) ;
— placage trop mou (par exemple : aluminium) ;
— altération à chaud (par exemple : titane) ;
— support d'épaisseur variable.

En revanche, le soudage par explosion permet la réalisation de liaisons locales telles que le soudage de tubes sur des plaques tubulaires.

4.5. Soudage par friction. — Créé simultanément en U.R.S.S. et aux États-Unis d'Amérique vers 1960, ce procédé s'est ensuite répandu. Il utilise l'échauffement local engendré par frottement l'un contre l'autre de deux éléments coaxiaux à assembler, l'un fixe, l'autre en rotation rapide. L'élément en rotation est celui de plus faible encombrement.

On peut aussi, en principe, souder deux longues barres fixes en faisant tourner entre elles un court élément intermédiaire (raboutage de ronds ou de tubes).

Après mise en rotation de l'élément tournant, on établit le contact et on exerce une poussée axiale pour provoquer un échauffement local jusqu'à la température de soudage. Il se forme une bavure par écrasement. Après l'arrêt, l'effort est maintenu ou accru (forgeage). On distingue trois types de machines :

— Machines directes à vitesse constante et effort soit constant, soit programmé ; arrêt par freinage ou débrayage.

— Machines à volant d'inertie, la pression programmée ne s'exerce qu'au moment où la vitesse maximale est atteinte et cela jusqu'à l'arrêt par grippage.

— Machines mixtes.

Certaines machines assurent l'ébavurage.

La surface du joint est plane ou conique, pleine ou évidée, circulaire ou polygonale.

Les machines sont spécialisées pour des éléments ayant des diamètres déterminés, la gamme totale s'étendant de 3 à 100 mm et les fréquences de rotation de 40 000 à 2 000 tr/mn. Leur coût élevé limite le procédé aux productions en série.

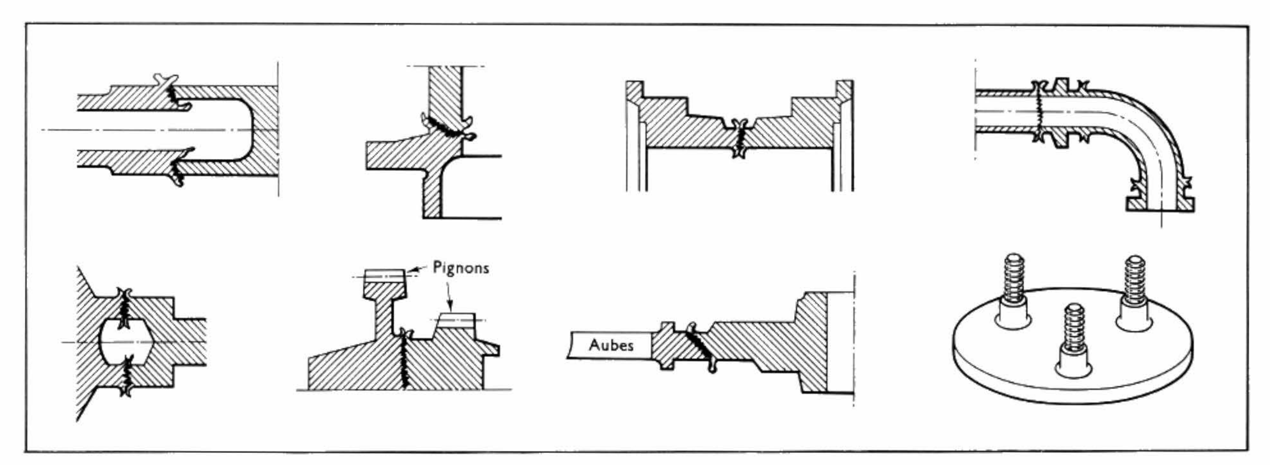


Fig. 52 — Quelques exemples de pièces soudées par friction (*d'après document Carterpillar*)

La figure 52 donne quelques exemples typiques d'applications du soudage par friction.

Le procédé est remarquable car il permet la localisation de la chaleur et il rend possible de nombreux assemblages hétérogènes (par exemple : liaisons fer-titane). Il convient à des productions mécaniques de précision et peut s'étendre à des alliages durs.

Les matériaux à assembler doivent pouvoir être échauffés par friction (la fonte ne convient pas) et ils doivent présenter une bonne tenue à l'écrasement (l'aluminium pur doit être sous forme écrouie).

4.6. Soudage par diffusion. — Bien que toutes les soudures de métaux procèdent par diffusion, on réserve cette appellation à l'ensemble des procédés qui, conjuguant un effort et un temps de maintien suffisants, permettent des assemblages à des températures inférieures à celles nécessaires avec les procédés ordinaires de soudage. Le but recherché est d'engendrer le minimum de déformations lors de l'assemblage d'éléments préusinés avec précision.

L'aptitude au soudage par diffusion est variable selon les métaux ou alliages. Des associations hétérogènes sont souvent les plus faciles à réaliser. Des surfaces dressées présentant des rugosités sont préférables à des joints polis. Selon les cas, des traces d'oxyde superficielles facilitent ou s'opposent aux liaisons.

Les aciers ne sont soudables par diffusion qu'au-dessus de 1 000 °C, l'oxyde de chrome des aciers inoxydables étant un obstacle à la liaison. Les alliages de cuivre et d'aluminium diffusent aisément. Les liaisons sont nécessairement exécutées dans une atmosphère neutre ou réductrice. Elles sont grandement facilitées en opérant sous vide. Un mouillage préalable par un métal de brasage peut fournir une première liaison, consolidée ensuite par diffusion du matériau interstitiel dans la masse.

Exemple : diffusion des aciers après brasage au cuivre, des aciers inoxydables après dépôt de carbone, des alliages d'aluminium après dépôt de gallium.

Ce mode d'assemblage est cependant de préparation et d'exécution délicates, lentes et coûteuses.

4.7. Soudage à froid. — Certains métaux ou alliages ductiles se soudent à eux-mêmes ou entre eux sous l'effet d'un frottement instantané suffisamment énergique, très différent de celui nécessaire au soudage par friction. Il est appliqué, par exemple, au gainage sous plomb de conducteurs électriques ou à l'assemblage par frottement, sous presse à emboutir, d'éléments tels que fonds de boîtes, capsules ou flacons en aluminium, cuivre ou laiton. L'opération a lieu à froid, sur pièce tiédie ou sous l'échauffement local que la friction engendre.

4.8. Soudage par ultrasons. — Les vibrations ultrasoniques transmises localement aux éléments à assembler par les *sonotrodes* d'un générateur d'ultrasons ayant un peu l'aspect des électrodes d'une machine à souder par points) réalisent, sous pression modérée, une espèce de soudure à froid. Les applications du procédé sont actuellement limitées à certaines fabrications, telles que l'assemblage d'éléments en matière plastique thermodurcie qui ne sont ni plastifiables, ni collables, l'assemblage des éléments de transistors qui seraient détruits par échauffement, la fermeture de tubes métalliques d'emballage pour produits ménagers, déjà emplis de leur contenu.

4.9. Soudage électrique par résistance. — Ce procédé associe un échauffement local des éléments à assembler (il est obtenu par passage d'un courant électrique) et l'application d'un effort assurant la liaison.

Il nécessite un courant très intense qui est fourni sous une faible tension par un transformateur dont la boucle secondaire unique, enserre l'aire la plus réduite possible et se ferme sur la région d'assemblage de la pièce.

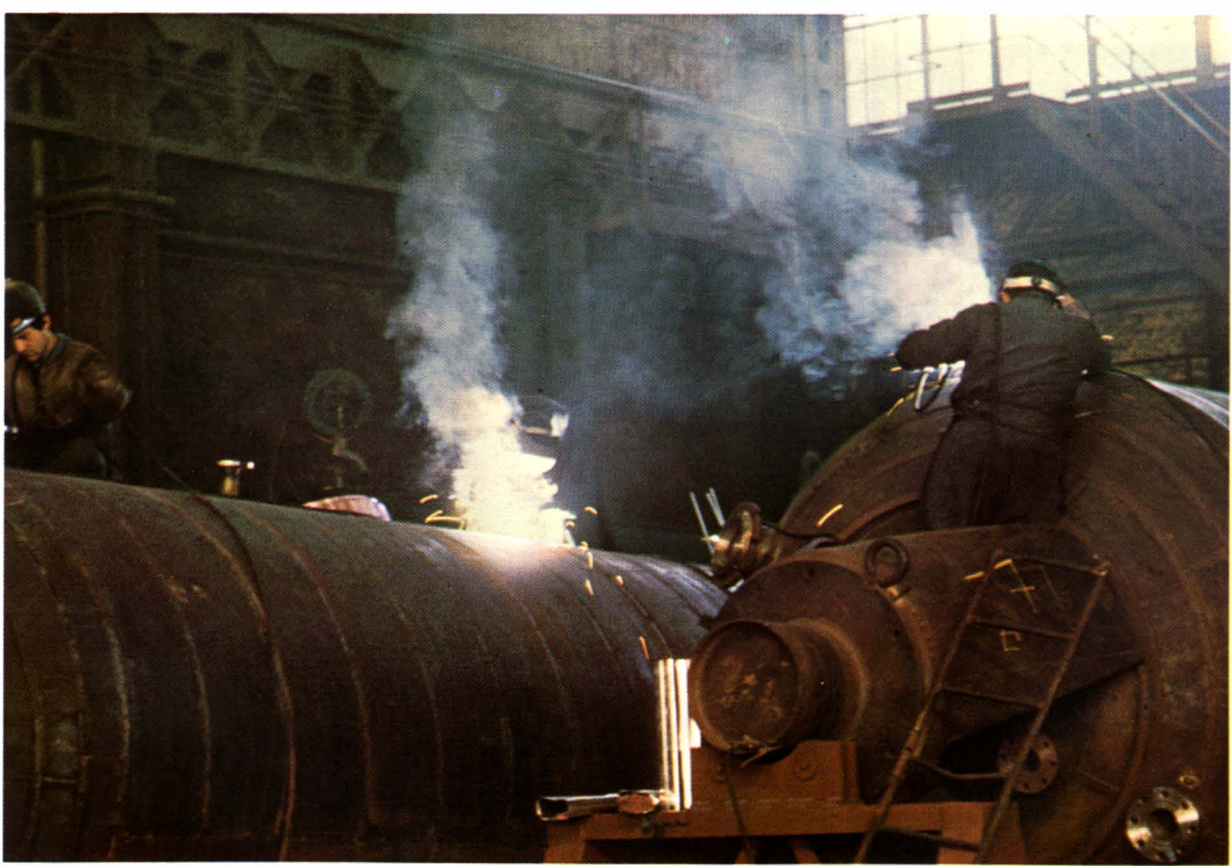
Présenté déjà, sous toutes ses variantes, dès 1877 par le professeur américain Elihu Thomson, dont l'imagination fut prodigieuse, le procédé ne s'est concrétisé qu'à partir de 1925, avec l'essor de la construction automobile en série ; son développement depuis est considérable.



Soudage

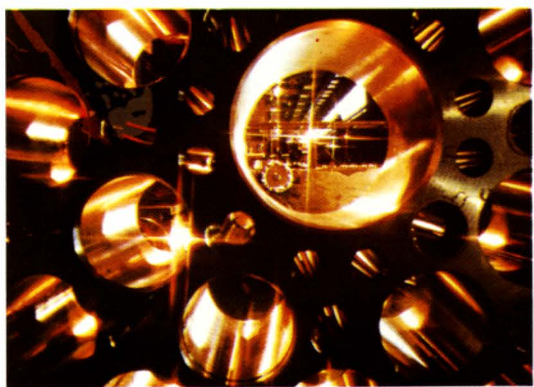
Ci-contre, assemblage d'éléments d'un convertisseur d'aciérie.

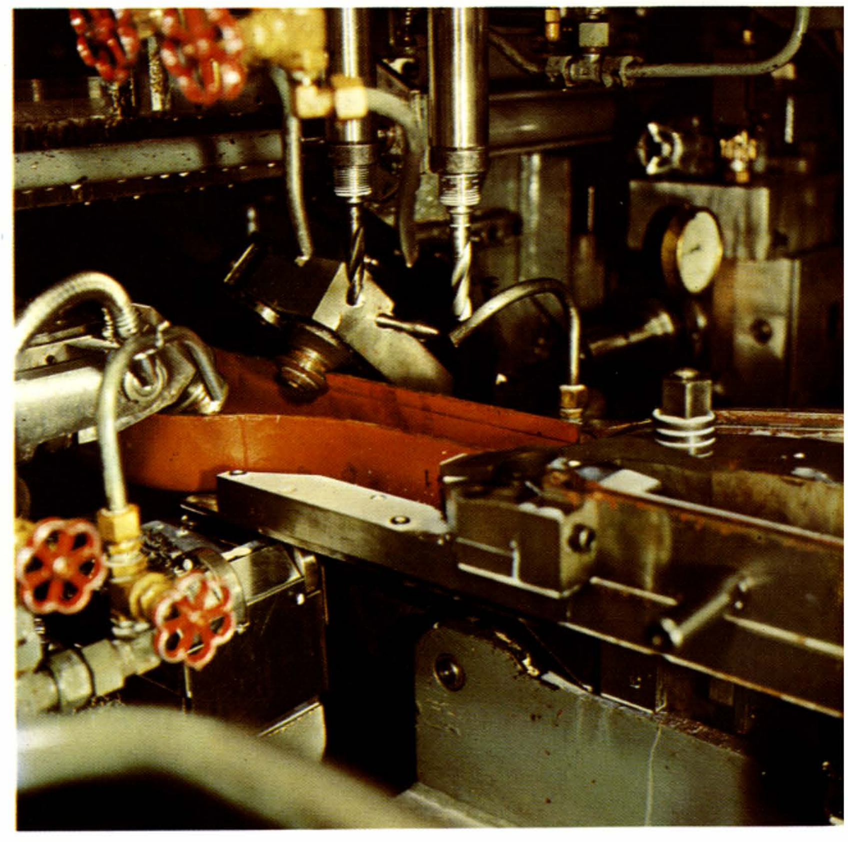
Ci-dessous, soudage d'autoclaves.



Photos : Creusot-Loire.

Usinage





En haut, fraisage-alésage de précision sur une pièce de réacteur nucléaire.

Ci-dessus, usinage de précision d'une pièce de réacteur nucléaire.

A droite, poste de perçage sur machine-transfert automatique pour longerons de châssis de camions.

Photos : Creusot-Loire, Renault.

On distingue :
— le soudage en bout exécutable sous trois régimes : par résistance pure, par étincelage ou par effet mixte ;
— le soudage par points ainsi que ses deux variantes : à la molette et sur bossages.

Pour chacun de ces domaines, le courant secondaire traversant la pièce est soit simplement un courant alternatif soit un courant redressé ou faiblement ondulé obtenu au moyen de puissants ignitrons ou thyristors (machine monophasée ou triphasée). Les commandes des différentes opérations de la machine sont, soit électromagnétiques, soit électroniques ; dans ce cas, les enclenchements et coupures de courant des machines rapides à souder par points ou à la molette sont synchronisés sur le courant.

4.9.1. Soudage en bout. — Les éléments *a* et *b* (fig. VII-53) à assembler sur toute leur section transversale sont serrés entre les mâchoires conductrices de la machine. Il faut donc pouvoir maintenir ces éléments et que leur état de surface permette un contact électrique suffisamment bon. Le transformateur, généralement monophasé, étant disposé sous les mâchoires, le facteur de puissance de la machine est important.

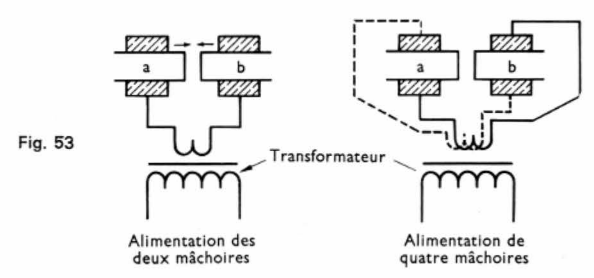


Fig. 53

Soudage en bout par résistance électrique

Lorsque l'on soude par résistance pure, les éléments à assembler sont de nature identique ou voisine ; ils sont d'égale section et disposés bout à bout. Leur préparation à coupe droite est bien dressée et propre ; la longueur de métal sortie des mâchoires est relativement importante et l'échauffement par effet Joule a lieu en profondeur. L'opération est relativement lente et la consommation d'énergie importante. L'effort final, exercé sur bords portés au blanc soudant, provoque un renflement assez volumineux par refoulement (fig. 54). Seules les barres à section suffisante pour résister au flambage sont soudables par ce procédé.

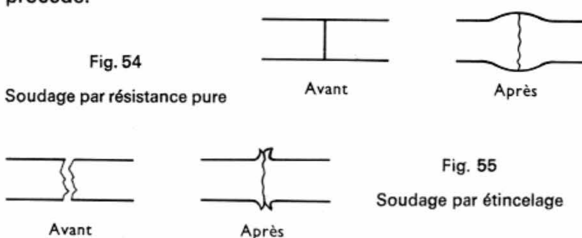


Fig. 54

Soudage par résistance pure

Fig. 55

Soudage par étincelage

Du fait de l'absence de frottement, on risque le collage si les surfaces à assembler se couvrent d'oxyde réfractaire à chaud (exemple : acier inoxydable et aluminium). Lorsqu'on procède par étincelage, la coupe des éléments à assembler est de préférence grossière, la longueur sortie des mâchoires est faible et le courant secondaire est fourni sous une tension plus grande. Les extrémités, d'abord en contact, sont un peu écartées et l'étincelage a lieu, provoquant l'échauffement des bords et une projection latérale de métal fondu ; les bords sont avancés en suivant la cadence de leur destruction. Lorsque, du fait de l'étincelage, ces bords sont parvenus à fusion franche et avivés l'un par rapport à l'autre, ils sont brutalement serrés l'un contre l'autre. Dans ce cas, il n'y a pas renflement comme en soudage par résistance pure, mais formation d'une bavure de métal fondu et écrasé (fig. 55) ; elle sera ensuite éliminée. Au cours de l'étincelage, les gaz naturellement dégagés par le métal suffisent à créer une atmosphère protectrice. Avec réglages appropriés, on peut assembler à peu près tous les métaux et alliages par étincelage. Les aciers sensibles à la trempe doivent être préalablement parcourus par un courant de préchauffage ; après soudage un recuit peut avoir lieu entre les mâchoires de la machine. On soude ainsi, par exemple, les aciers rapides et on raboute des fils ou des barres de précontrainte.

Il faut une plus grande puissance électrique et un effort plus grand (surtout avec les métaux durs) que pour souder par résistance pure, mais l'opération est plus rapide et elle nécessite un courant moins intense ; la chaleur restant plus concentrée, le flambage n'est pas à craindre et on peut souder des tôles à partir de 8/10 mm et des fils à partir de 5/10 mm de diamètre (des fils plus fins sont soudés par décharge de condensateur).

On peut souder par étincelage des profils tourmentés, mais d'épaisseur constante ; cependant, les mâchoires doivent maintenir et amener le courant à la totalité de la section. Avec des mâchoires appropriées, on peut souder sur coupes biaises (confection de châssis métalliques en acier, acier inoxydable ou aluminium), ou réaliser des assemblages en T, ou assembler des éléments de sections différentes.

On réalise en série des raboutages de tubes pour fabriquer des faisceaux de chaudières ou d'échangeurs ; une insufflation gazeuse simultanée réduit la bavure intérieure.

Sur sections massives, le soudage par étincelage exigerait des machines trop puissantes et la répartition de la température, trop localisée en bordure, risquerait de provoquer des tapures.

Le soudage mixte remédie à ces inconvénients. Il consiste à amorcer des phases successives d'étincelage entre lesquelles s'insèrent des périodes de chauffage par résistance qui ont pour effet d'approfondir la zone de métal échauffé. La méthode convient, par exemple, au soudage de rails ou d'éléments massifs tels que ceux utilisés à la confection de pièces de forge ou de gros vilebrequins.

Le régime thermique adouci de ce procédé convient mieux aux aciers trempants ou sensibles à la fissuration.

4.9.2. Soudage à recouvrement

1° *Soudage par points.* — Les éléments à assembler, d'épaisseur e_1 et e_2, sont serrés (fig. 56) entre deux électrodes, soit de cuivre écroui, soit de cuivre faiblement allié, énergiquement refroidies. Elles sont généralement à pointe conique, à 120° ,avec méplat. Pour les alliages légers, on peut utiliser des pointes sphériques. L'ensemble est traversé par un courant intense fourni sous une basse tension (quelques volts) par un transformateur. Il se produit un échauffement, par effet Joule, de la colonne de métal entre électrodes du fait de leur résistance propre et de la résistance de contact entre tôles (qu'il y a intérêt à maintenir à une valeur constante). Les résistances de contact entre électrodes et tôles doivent être les plus faibles possibles pour limiter l'échauffement des électrodes.

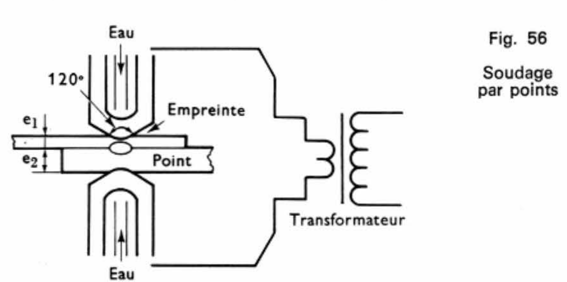


Fig. 56

Soudage par points

Il se forme un noyau interne de métal en fusion, maintenu en place, en dépit de l'expansion du métal fondu, par l'effort qu'exercent les électrodes.

Le courant est alors coupé tandis que l'effort est maintenu le temps nécessaire à la solidification et à la rigidification du point et de son voisinage. Le retrait du métal solidifié donne lieu à affaissement avec légère pénétration des électrodes qui, de ce fait, marquent extérieurement le

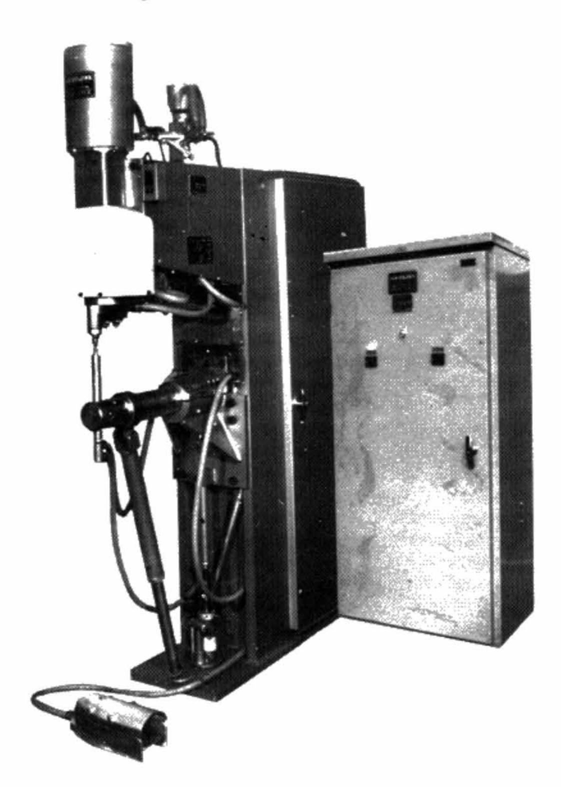


Fig. 57 — Machine moderne à souder par points à courant redressé (diodes silicium, contacteurs à thyristors) de 400 kVA - 50 000 A max., convenant à l'acier doux, au laiton et à l'aluminium de 0,5 à 3 mm (*Sciaky*)

point (empreinte ou indentation). À partir de 3 mm d'épaisseur, après solidification du point, certaines machines exercent un effort de forgeage améliorant la structure de surchauffe du noyau et de son voisinage.

Le point suffisamment refroidi et devenu robuste, les électrodes s'écartent, libérant la pièce, et sont prêtes pour l'exécution du point suivant.

Certaines machines comportent deux écartements d'électrodes, l'un faible, juste suffisant pour le passage d'un point à l'autre, l'autre important pour l'introduction et la sortie de la pièce ou pour le passage d'obstacles tels que nervures ou raidisseurs.

Les meilleures conditions de soudage sont réalisées lorsque les éléments à assembler sont de même nature et de même épaisseur. S'il n'en est pas ainsi le noyau fondu tend à se déporter vers l'élément le plus épais, ou vers celui de plus grande résistivité (toutes choses égales par ailleurs) ; cela diminue le diamètre utile du point et rend sa qualité incertaine. On y remédie en plaçant du côté de la tôle la plus épaisse (ou de plus grande résistivité) une électrode plus large diffusant l'énergie et dont l'effet refroidisseur accru repousse le noyau vers le plan du joint. Lorsqu'on soude des tôles d'épaisseurs différentes, les réglages optimaux sont plus délicats à atteindre. Il est recommandé de ne pas dépasser un rapport $\frac{e_1}{e_2}$ de 3. On peut souder plus de deux tôles superposées à la condition que l'épaisseur totale désirée ne dépasse pas la capacité maximale de la machine. On soude depuis des clinquants de 1/100 mm d'épaisseur jusqu'à des tôles de 12 mm et même 25 mm d'épaisseur, mais les machines courantes ont des capacités s'échelonnant de 0,5 à 8 mm d'épaisseur.

Des machines rapides exécutent jusqu'à 500 points par minute sur des tôles minces d'acier. Sur des pièces épaisses d'acier calaminé, les temps de passage peuvent atteindre 0,5 mn ; on améliore alors le comportement de la machine par passage d'un courant pulsé.

Les conditions d'exécution des points varient avec la résistivité du métal. Ainsi, l'acier inoxydable austénitique exige moins de courant que l'acier au carbone. Le soudage de l'aluminium nécessite des densités de courant considérables malgré le bas point de fusion de ce métal ; elles ne peuvent être obtenues qu'avec des machines de forte puissance. Le cuivre non allié est pratiquement non soudable. Sur acier au carbone ou allié, la rouille est à éliminer ; la calamine, conductrice à chaud, permettrait le soudage après régime de préchauffage, mais son influence est néfaste (formation de soufflures dans le noyau, crachement des points, incertitude de qualité, destruction prématurée des électrodes). C'est pourquoi le décapage ou le grenaillage préalable des tôles à souder est recommandé. Les tôles décapées peuvent être soudées avec leur graisse de protection, celle-ci étant expulsée sous la pression des électrodes. La tôle galvanisée est soudable. La tôle cadmiée émet des vapeurs dangereuses. La tôle étamée donne une soudure fragile par incorporation d'étain dans le noyau.

Les pièces d'aluminium ou d'alliages d'aluminium peuvent être soit soudées (fig. 57) à l'état brut de laminage avec graisses de protection (c'est le mode de soudage industriel sous l'état de livraison), soit après exécution d'un décapage chimique ou mécanique précis contrôlé par mesure de la résistance de contact (c'est le mode de préparation exigé en construction aéronautique car il assure le minimum de dispersions des résultats). Les réglages de bonne exécution (pour ces deux cas) sont essentiellement différents.

Les aciers non alliés à moins de 0,15 % de carbone, étant pratiquement exempts d'effet de trempe, sont soudables sans précaution. Aux autres aciers, plus carburés ou alliés, le régime rapide de soudage inflige une trempe sévère. On évite ce risque en utilisant une machine à souder comportant un cycle de préchauffage et un cycle de post-chauffage. La cadence de soudage s'en trouve considérablement ralentie.

Le tableau ci-après donne un aperçu des caractéristiques d'exécution de points sur acier doux.

e (millimètres)	0,5	1	2	4	8
Diamètre du méplat des électrodes (millimètres)	5	6	8	13	19
Effort (décanewtons)	160	230	360	880	3 500
Intensité efficace du courant secondaire (ampères)	8 000	9 000	12 000	18 000	32 000
Durée (secondes)	0,10	0,15	0,30	0,40	3,5
Rupture au cisaillement (décanewtons)	200	400	1 000	3 600	14 000

Suivant les conditions d'emploi, les machines à souder sont fixes ou mobiles. Des pinces mobiles de soudage pour tôles minces sont soit à transformateur séparé, soit à transformateur intégré.

Lorsque la position des points exige des bras de plus de 600 mm de long, le rendement devenant inacceptable on

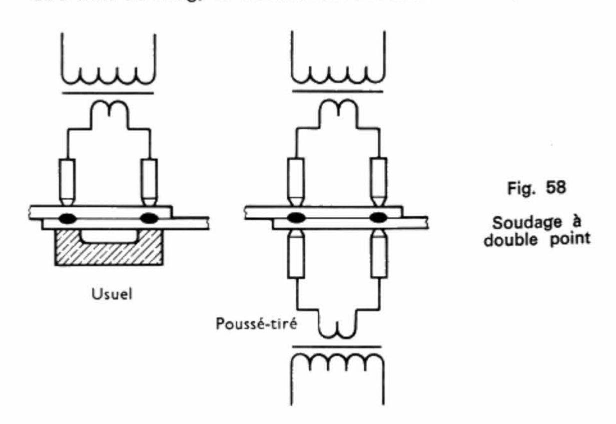


Fig. 58
Soudage à double point

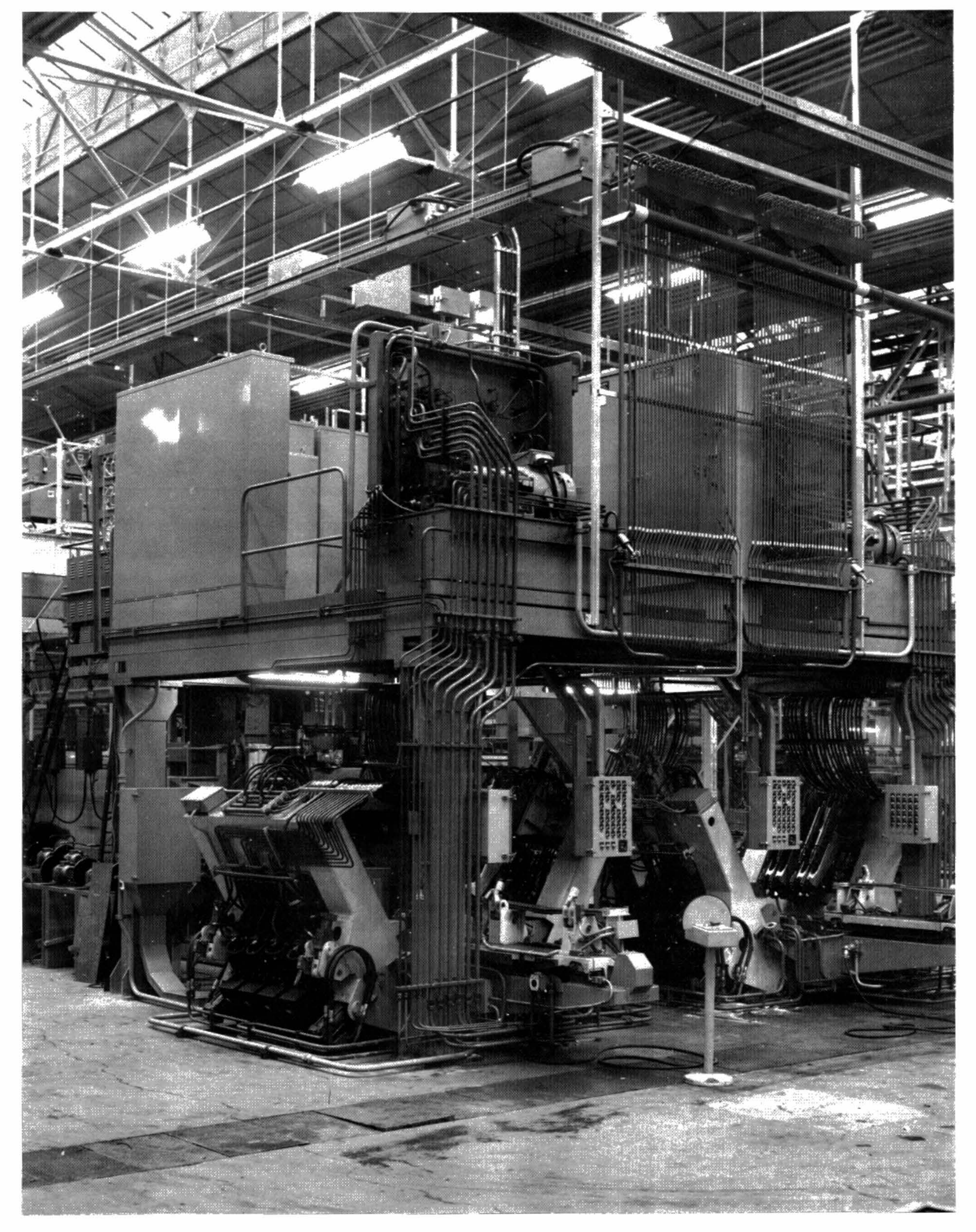
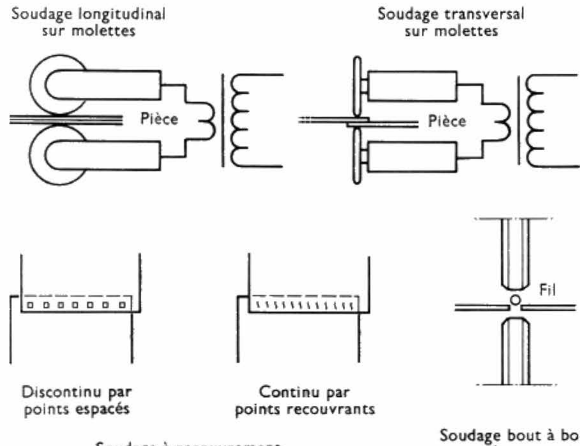


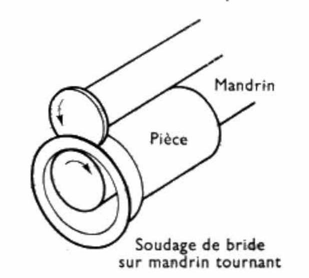
Fig. 59 — Machines automatiques pour soudage par points de traverses de suspension (tôles 3 + 3 mm, effort de 1 200 daN, 20 000 A, cadence de 70 pièces/heure par machine) (*Peugeot*)

préfère adopter la technique du double point (fig. 58) qui évite d'insérer la pièce dans la boucle de courant secondaire.

On accélère les fabrications de série sur acier en utilisant, notamment en carrosserie automobile, des presses à souder multipoints. Certaines exécutent jusqu'à 150 points en une même opération (fig. 59).

On soude par points les aciers écrouis sans recuire les abords du point. Cela est appliqué sans restriction en construction de voitures ferroviaires en acier inoxydable écroui.





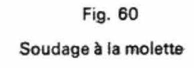


Fig. 60

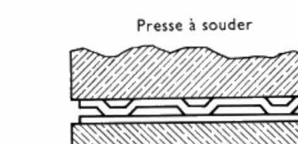
Soudage à la molette

2° *Soudage à la molette* (fig. 60). — Il peut être exécuté sur assemblage plan ou sur joint circulaire ou conique. L'entraînement de la pièce ou du bras coulissant de la machine est obtenu par commande de rotation de l'une ou des deux molettes. En cas de joint circulaire, les deux molettes peuvent être accouplées par différentiel.

Le réglage du soudage à la molette est plus délicat. Un excellent état de surface est nécessaire. On ne peut dépasser 3 + 3 mm. À épaisseur égale, les efforts et les intensités de courant sont plus grands qu'en soudage par points (fig. 61). Un arrosage abondant des pièces évite leur échauffement. La technique de soudage double point sur deux lignes parallèles peut être éventuellement utilisée.

Le soudage à la molette, à bords jointifs avec fil incorporé, conduit au soudage bout à bout.

3° *Soudage par bossages.* — En son aspect classique (fig. 62), ce procédé consiste à assembler à la presse, entre deux plateaux conducteurs de courant, deux tôles dont l'une comporte des bossages préalablement



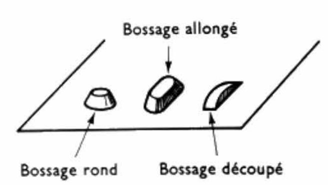


Fig. 62 — Soudage classique par bossages

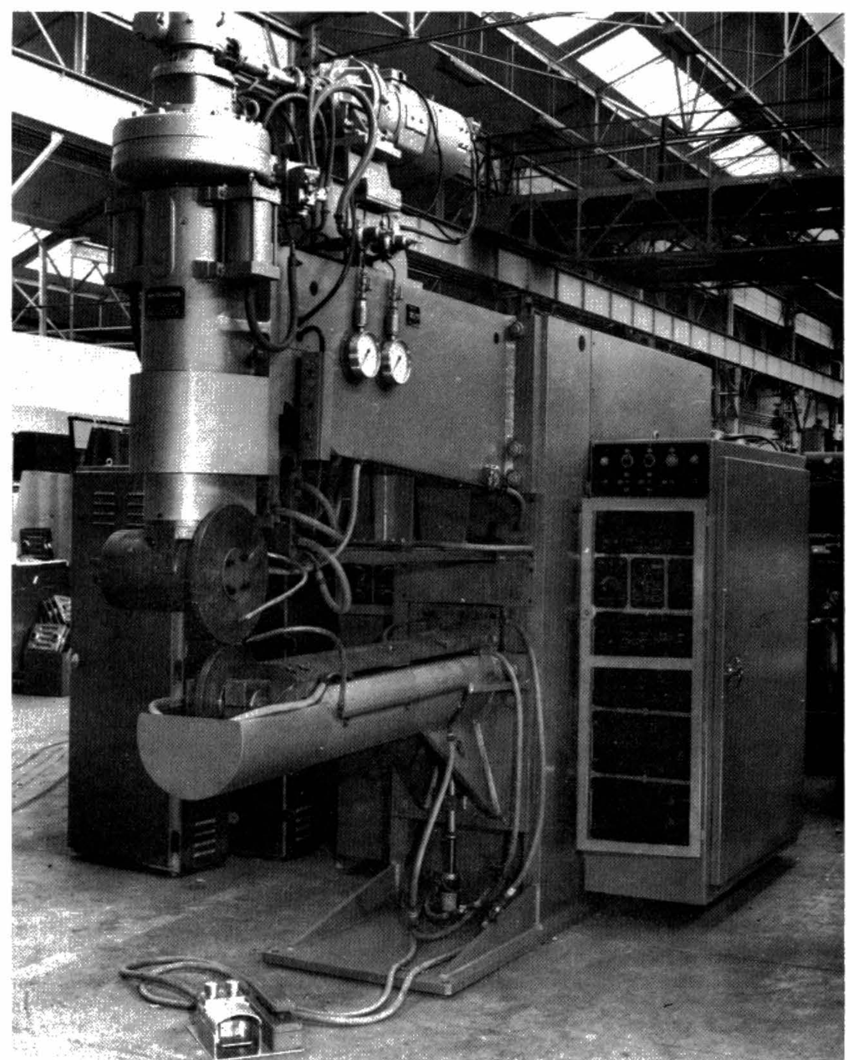


Fig. 61

Machine triphasée à souder à la molette par impulsions convenant au soudage de l'acier, de l'aluminium, des alliages réfractaires, du titane; soudage transversal ou longitudinal avec un serrage maximal de 4 000 daN (*Sciaky*)

réalisés par emboutissage. L'échauffement, par passage de courant, conjugué à l'effort permet d'écraser les bossages en formant des points de soudure. On peut souder des tôles de 0,3 à 5 mm d'épaisseur ; une difficulté réside dans l'obtention d'une égale répartition d'énergie entre tous les points exécutés simultanément.

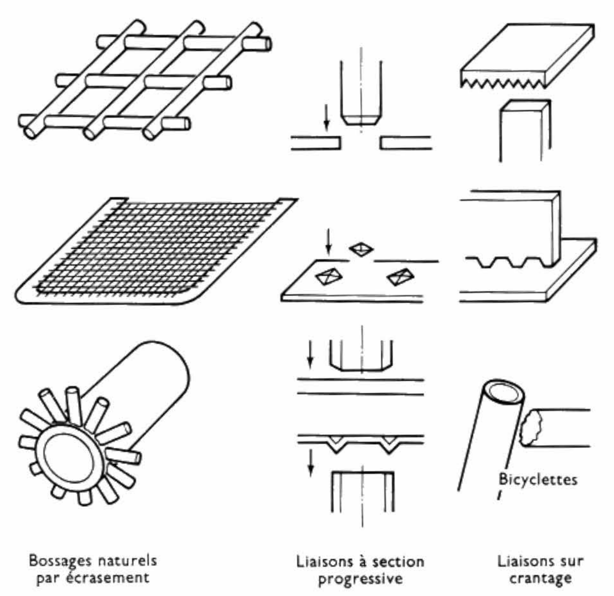


Fig. 63 — Soudages spéciaux sur bossages

L'écrasement, lorsque le courant passe, de joints préparés par crantage ou par contact d'arête, constitue des variantes du soudage par bossages (fig. 63).

5. EFFETS MÉTALLURGIQUES DES CYCLES THERMIQUES DE SOUDAGE

Dans leur quasi-totalité, les procédés de soudage s'accompagnent d'un cycle thermique local échauffement-refroidissement des éléments assemblés. Trop lent, il peut engendrer la surchauffe. Trop rapide, il détermine la trempe des matériaux lorsque ceux-ci y sont sensibles.

Si, dans son principe, le soudage s'applique à tous les métaux et alliages, dans la réalité il convient de faire un choix des procédés et modes de soudage selon les particularités du matériau, son état de traitement, les épaisseurs et formes des pièces, de façon à obtenir un assemblage ayant les caractéristiques désirées. Cette recherche nécessite une connaissance approfondie de la métallurgie du soudage.

Les quelques exemples ci-après permettent d'apprécier la diversité et la complexité des problèmes métallurgiques posés par la pratique du soudage.

— Un alliage qui a un point de fusion très près de la température d'ébullition d'un de ses éléments (cas du laiton qui fond à 880 °C et contient du zinc dont l'ébullition a lieu à 907 °C) supporte mal la surchauffe du bain fondu. En soudage à l'arc, on procède au préchauffage de la pièce. Le transfert de laiton dans l'arc étant impossible, les électrodes sont en cupro-aluminium ; elles sont choisies de préférence de gros diamètre et le courant de soudage est limité. Le soudage oxyacétylénique convient, à condition d'utiliser une flamme très oxydante : une pellicule d'oxyde de zinc solide se forme alors sur le métal ; elle s'oppose au départ du zinc et à la formation de soufflures. Un flux est nécessaire pour scorifier cette pellicule.

— Un alliage peut avoir un très large intervalle de fusion, tel est le cas des bronzes à l'étain industriels. Dans cet intervalle, les éléments volatils tels que zinc et phosphore donnent lieu à formation de soufflures dans le métal fondu. On évite les procédés de soudage entraînant la fusion du métal de base et on préfère le soudo-brasage au soudage.

Le large intervalle de fusion peut être cause aussi de criques à chaud ; tel est le cas de certains alliages d'aluminium ou de métaux réfractaires. Un préchauffage important atténue les contraintes dans le métal en cours de solidification.

— Un métal ou alliage dépourvu de point de transformation polymorphique peut être obtenu à grain fin par corroyage. Lors du soudage il subit un grossissement de grain d'autant plus important que le cycle thermique est lent. Dans ce cas, il ne sert à rien de multiplier les passes de soudage, aucun affinage par recuit ne pouvant en découler. Les métaux parfaitement ductiles par nature tels que le cuivre et ses alliages, l'aluminium et certains de ses alliages, les aciers austénitiques, ne sont pas affectés par un grossissement de grain. Au contraire, les aciers ferritiques au chrome, sensibles à la grosseur de grain, sont fragilisés par le soudage par fusion ; seuls les procédés s'accompagnant d'un forgeage à chaud affinant la structure, tels que le soudage par résistance électrique et le soudage par friction, sont alors applicables.

— Les alliages comportant un point de transformation polymorphique sont affinables par recuit. C'est le cas des aciers de construction au carbone ou faiblement alliés. Ils peuvent acquérir un grain fin en soudage par fusion multipasse, une passe recuisant l'autre, tandis que les soudures trop puissantes (soudage vertical sous laitier) ne sont améliorables que par un recuit de régénération.

— Les alliages à point de transformation, lors d'un refroidissement rapide donnent généralement lieu à un durcissement de trempe par formation d'un constituant intermédiaire entre l'état stable à chaud et l'état stable à froid. Tel est le cas de la martensite qui durcit les aciers au carbone ou faiblement alliés.

L'apparition de martensite est redoutée pour les aciers de construction car il y a alors risque de fissuration (dit de fissuration à froid), risque aggravé souvent par la présence d'hydrogène (apporté par les flux de soudage ou par l'humidité de l'apport ou de la pièce) et par les contraintes au retrait bridé des assemblages.

C'est pourquoi on évite de souder les aciers à forte teneur en carbone ou à pouvoir trempant excessif ; dans les cas difficiles, on adopte une énergie de soudage suffisante et on complète le traitement par un préchauffage à maintien prolongé, pour obtenir un refroidissement à vitesse modérée de la région soudée.

— En dehors du risque de trempe qui peut les affecter, les aciers au carbone ou faiblement alliés peuvent être marqués par une tendance plus ou moins prononcée au risque de rupture fragile. Ce risque dépend de la qualité ; il peut aussi bien affecter les aciers doux que les aciers trempants. La présence d'entailles dans les soudures, un grain trop grossier de la soudure, des contraintes résiduelles excessives, une forte épaisseur, une basse température de service, peuvent provoquer l'amorçage d'une rupture fragile.

On évite ce risque par un choix convenable de la qualité d'acier, par un tracé correct de la construction, par une exécution soignée des soudures (séquence de soudage judicieuse) et par un traitement thermique de relaxation des contraintes si nécessaire.

En ce qui concerne les aciers au carbone, on adopte :

— soit des aciers de la norme NF A 35-501 de nuance E 24, E 26, E 30 et E 36 pour les constructions d'usage général, en choisissant les qualités 1 à 4 pour E 24, 3 à 4 pour E 26, 3 ou 4 pour E 30 et E 36 selon les destinations ;

— soit des aciers A 37, A 42, A 48 ou A 52 de la norme NF A 36-205 pour les appareils à pression en choisissant les catégories C pour les services entre 100 et 400 °C ou P pour les services entre la température ambiante et — 40 °C.

On évite soigneusement les aciers chargés en carbone tels que XC 32, XC 38, XC 45, etc. trop sensibles à la trempe et insuffisamment résilients.

Pour des hautes performances mécaniques, les nuances aéronautiques 15 CDV 6 et 25 CD 4 conviennent aux constructions soudées ainsi que de nombreuses marques d'aciers soudables à haute limite d'élasticité.

Au sujet des aciers alliés soudables pour récipients à pression soumis à des températures élevées, la norme NF A 36-206 indique les nuances 15 D 3, 18 MD 4-05, 15 MD 4-05 remarquables pour leur élasticité à chaud ainsi que 15 CD 2-05, 15 CD 4-05, 10 CD 9-10 convenant pour leur tenue au fluage à chaud.

Pour les basses températures, la norme NF A 36-208 définit la gamme suivante d'aciers soudables au nickel: 0,5 Ni, 1,5 Ni, 2,25 Ni, 3,5 Ni, 5 Ni, 9 Ni, convenant respectivement jusqu'à 50, 70, 80, 100, 120, 196 °C.

Les aciers usuels au carbone ou faiblement alliés qui ont été durcis par trempe martensitique sont adoucis par un traitement de revenu transformant la martensite en sorbite résiliente.

Certains aciers alliés dits à bas carbone subissent au contraire une trempe martensitique douce et ductile qu'on consolide ensuite par durcissement de revenu grâce à la précipitation en phase martensitique de certains composés intermétalliques. Ces aciers sont dits à durcissement structural. Contrairement aux aciers ordinaires, il faut les souder sous régime de trempe et terminer l'opération par un revenu, à moins que le régime multipasse réalise ce dernier traitement. Tels sont les cas d'aciers à haute résistance, comme le T_1, le maraging, etc.

Certains alliages d'aluminium adoucis par trempe au soudage s'améliorent dans le temps par maturation de la région soudée (exemple: A-Z 5 G). D'autres comme l'AU 4 G ont, à l'état fondu, une structure grossière que seul un corroyage peut améliorer. Ils ne sont soudables que par des procédés comportant un forgeage, tel que le soudage par résistance électrique ou par friction.

Les aciers à haute teneur en nickel tel que le 9 % Ni utilisé en cryogénie sont altérés par fusion. On les soude avec un métal d'apport en acier austénitique à haute résistance. Déjà l'acier à 3,5 % est à la limite des possibilités de soudage homogène.

— Les aciers inoxydables doivent leur bonne résistance à la corrosion à une teneur élevée en chrome. Les aciers inoxydables austénitiques sont livrés à l'état hypertrempé, état qui élimine toute présence de carbure de chrome. Si l'acier contient plus de 0,03 % de carbone ou si contenant entre 0,03 et 0,07 % de carbone, il n'est pas stabilisé par une quantité suffisante de titane ou de niobium, au soudage, le métal bordant l'assemblage chauffé entre 450 et 900 °C, donne lieu, à une précipitation intergranulaire de carbure de chrome dans les joints de grains. La teneur en chrome est alors abaissée et cela provoque, en service, la corrosion intergranulaire locale de ces régions, à moins que les formes et dimensions de la pièce permettent un traitement final d'hypertrempe. Les aciers Z 2 CN 18-10, Z 6 CNT 18-11 Z 6 CNNb 18-11, Z 2 CND 17-12 (ou 13), Z 8 CNDT 17-12 (ou 13), Z 6 CND Nb 17-12 (ou 13) de la norme NF A 35-572 conviennent aux constructions soudées résistant à la corrosion et n'exigent pas la répétition du traitement d'hypertrempe après soudage.

6. CONTRAINTES ET DÉFORMATIONS DUES AU RETRAIT DE SOUDAGE

La dissymétrie du cycle thermique correspondant au soudage exécuté de proche en proche et la contraction du métal d'apport déposé en cours d'opération engendrent des contraintes et des déformations de retrait.

Pour mieux en analyser les effets, on considère le retrait longitudinal et le retrait transversal.

Le retrait longitudinal détermine un raccourcissement local de la pièce et, par autobridage, une contrainte longitudinale de la région soudée égale à la limite d'élasticité du matériau.

Si la pièce est soudée longitudinalement sur son axe de symétrie ou sur son axe neutre, ou si plusieurs soudures longitudinales s'équilibrent vis-à-vis de l'axe neutre de la pièce, cette pièce reste rectiligne ou conserve sa courbure. Si la soudure longitudinale est excentrée vis-à-vis de l'axe neutre, une inflexion se produit: la soudure se trouve dans la région raccourcie.

Lorsque les éléments à assembler sont libres, le retrait transversal est un raccourcissement sans contrainte. Si les éléments sont bridés, des contraintes transversales se développent. Le retrait transversal d'une soudure en chanfrein ou d'un cordon d'angle étant plus important en surface qu'en racine, un pliage de la pièce se produit autour de cette racine pour charnière.

On maîtrise les effets de retrait en soudage en adoptant les règles suivantes:

— choix d'une séquence de soudage permettant de toujours souder à retrait transversal libre;

— soudage symétrique des assemblages disposés symétriquement;

— compensation des effets des assemblages dissymétriques par des bridages sur montage, des prédéformations opposées, ou des chaudes de retrait;

— réalisation en premier lieu des plus petits assemblages de détail dont on compense pas à pas les déformations successives et en second lieu des assemblages principaux.

Cette dernière règle est la même d'ailleurs que celle qui régit la construction avec préfabrication.

Dans de nombreux cas, ces règles simples ne sont pas entièrement compatibles. L'art du soudeur consiste à choisir le compromis le plus favorable.

Les chaudes de retrait habilement utilisées constituent un moyen commode et efficace de réduction des déformations engendrées par le soudage.

7. CONCEPTION ET CALCUL DES CONSTRUCTIONS SOUDÉES

En fonction des principaux risques auxquels les constructions sont exposées: déformations excessives, ruine plastique, ruine par fatigue, rupture fragile, corrosion, abrasion, etc., ainsi que de l'économie de réalisation et d'entretien, l'étude d'une construction soudée comprend le choix des matériaux et de leur état, le choix du procédé de soudage, du mode d'exécution et de la préparation des assemblages ainsi que des traitements éventuels après soudage.

Les calculs justificatifs de la construction et de ses assemblages sont conduits en fonction des différents risques à éviter. Des règles de calcul ont été établies; elles sont souvent propres à certaines catégories de construction.

On n'est pas parvenu encore, faute d'expérience suffisante, à faire prévaloir des règles interprofessionnelles et internationales de calcul. Il faut dire qu'actuellement le développement d'emploi du soudage, le renouvellement des matériaux, des procédés de soudage, la sévérité accrue de service des constructions modifient incessamment les bases de conception et de calcul.

8. QUALITÉ DES SOUDURES

À des degrés divers, les soudures par fusion peuvent être affectées de défauts, soit externes tels que dénivellations, brisures, caniveaux, manques de pénétration, irrégularités de surépaisseur, porosités, fissures; soit internes tels que fissures, collages, manques de pénétration, soufflures.

Les défauts externes apparaissent à l'examen visuel. Les défauts externes pénétrants peuvent être visualisés par ressuage ou magnétoscopie.

Les défauts internes sont révélés soit par des essais destructifs, soit par radiographie ou examen par ultrasons. La radiographie permet de visualiser ces défauts mais elle ne donne pas d'indication relative à l'épaisseur de ceux-ci. Elle ne montre pas les défauts plans perpendiculaires au rayonnement et ne révèle pas les collages. L'examen par ultrasons révèle tous ces défauts mais leurs dimensions restent difficiles à préciser. Un contrôle attentif par ultrasons est excellent mais lent et coûteux.

Suivant les matériaux, les procédés de soudage, les préparations et les positions d'exécution, le risque d'obtention de tel ou tel type de défaut est plus ou moins probable. Pour les constructions qui le justifient on s'en garantit en obtenant du constructeur, un programme détaillé d'exécution des travaux en fonction duquel on vérifie, avant commencement d'exécution, la qualification du mode de soudage et la qualification des soudeurs par exécution d'éprouvettes reproduisant fidèlement les conditions réelles d'exécution des assemblages. On soumet celles-ci à des examens non destructifs et, s'il y a lieu, à des examens destructifs et des essais mécaniques.

Les tolérances d'acceptation de défauts externes et internes des soudures sont précisées en fonction de la nature et de l'importance des sollicitations de service des assemblages et des dangers qui pourraient résulter de leur ruine. En fonction de ces notions, dans chaque domaine de construction on s'efforce de définir des classes de qualité exigibles des assemblages. Les spécifications existent à ce sujet. Des organismes de contrôle sont spécialisés dans ces opérations de surveillance et de réception des fabrications.

9. BRASAGE

Le brasage a été défini au paragraphe 1 comme une opération connexe au soudage. Il nécessite une grande propreté des bords à assembler et une préparation à joints capillaires assurée par recouvrement ou emboîtement avec jeu inférieur à 0,1 mm ou au pis aller à 0,2 mm. On distingue le brasage tendre, à moins de 450 °C, et le brasage fort exécuté à une température plus élevée. Certaines brasures à haute température de fusion conviennent à des services à 620, 700, 800 et 900 °C (respectivement, argent-manganèse, or-nickel, nickel-manganèse-palladium, nickel-chrome-bore-silicium).

Le chauffage peut être rapide et anisotherme, par flamme, par induction, par résistance ou par rayonnement. Le métal d'apport peut alors contenir des éléments volatils mais être non fissurant (exemple: brasure quaternaire Cu-Ag-Zn-Cd). Le chauffage peut être lent et isotherme: au four, au trempé, au bain de sel. Le métal d'apport ne doit pas comporter d'éléments volatils; il importe peu alors qu'il soit fissurant (exemple: brasure eutectique Ag-Cu).

On distingue encore les brasures très diffusantes (exemple: eutectique Cu-P) convenant au brasage des alliages cuivreux et les brasures normales peu diffusantes (exemple: brasure à l'argent).

Le brasage étagé consiste à faire succéder dans le temps des brasures voisines en utilisant soit des apports dont les températures sont de fusions décroissantes, soit des brasures diffusantes.

Le brasage permet l'assemblage d'éléments de même nature ou d'éléments hétérogènes. Leur dilution n'est pas à craindre. Il suffit que chacun des éléments soit moins fusible que le métal d'apport choisi et soit mouillé par lui.

Le brasage convient à toutes sortes de travaux artisanaux, et aussi, convenablement exécuté et contrôlé, à des assemblages industriels complexes, précis, capables de hautes performances.

10. SOUDO-BRASAGE

Le soudo-brasage a été défini au paragraphe 1 comme une variante du brasage prenant l'aspect d'une soudure autogène par fusion.

Il n'existe pratiquement que deux procédés de soudo-brasage, tous deux exécutés à la flamme oxyacétylénique:

— le soudo-brasage au laiton spécial 60-40, au silicium, convenant à l'assemblage des aciers, des fontes, des alliages cuivreux;

— le soudo-brasage à l'alliage Al-Si 13 pour l'aluminium et les alliages A-U 4 G.

Le soudo-brasage convient à divers travaux artisanaux ou industriels.

USINAGE

INTRODUCTION

1. DÉFINITION DE L'USINAGE

Le terme usinage désigne tous les moyens mis en œuvre pour obtenir une pièce ayant des cotes et des tolérances fixées à l'avance, à partir d'un élément brut, tel qu'un lingot, ou semi-fini, tel qu'une pièce venue de forge ou de fonderie.

On estime assez souvent que le terme s'adresse à la fabrication de pièces métalliques, à l'exclusion du bois ou des matières plastiques; par métaux, on entend aussi bien les produits ferreux que les non ferreux, notamment les métaux et alliages légers et ultra-légers (aluminium et magnésium).

Cette restriction n'est pas adoptée universellement; il en résulte, dans les travaux internationaux et notamment les travaux de normalisation internationale (I S O) des divergences de vues qui, pour l'instant, retardent inutilement, semble-t-il, l'adoption de définitions valables pour tous les pays.

En France, actuellement, le plastique est considéré comme une matière rentrant dans la catégorie à laquelle s'appliquent les travaux d'usinage alors que le travail du bois est encore étudié à part. En Allemagne, au contraire, seuls les produits métalliques sont compris dans cette catégorie. On trouvera plus loin, à l'occasion des machines-outils, une définition plus précise de ce que l'on peut comprendre par le terme d'usinage.

2. HISTORIQUE

L'usinage s'est pratiqué pendant longtemps à la main; à cet effet, les anciens ouvriers utilisaient des outils assez rudimentaires avec lesquels le métal était usé ou arraché plutôt que coupé. Seules des machines simples telles que des tours de potier ou des machines telles que l'*ignitérébrateur*, consistant en une perche terminée par une pièce de métal frottant sur du silex et tournant sous l'action d'un véritable archet, permettaient d'obtenir un rendement un peu meilleur que le travail à la main. L'ingéniosité humaine conduisit peu à peu à la création de machines-outils qui se perfectionnèrent, notamment au cours du XIXe siècle.

En Europe, le début de l'industrialisation conduisit l'Angleterre, l'Allemagne et la France à développer le plus possible leurs moyens de production. La France peut s'enorgueillir d'avoir bénéficié des services d'hommes éminents tels que Ducommun, Colmant, Bariquand, Ernault, etc. et la production française est restée assez longtemps l'une des premières, surtout en qualité. Il appartenait aux États-Unis d'Amérique de créer une industrie extrêmement puissante, en ce qui concerne la machine-outil et l'outillage; tout était, en effet, à faire dans ce grand pays qui ne disposait d'aucun passé industriel et la supériorité américaine en la matière est encore loin d'être dépassée.

Les guerres successives encouragèrent les efforts de production à outrance que les fabrications en grandes séries, comme l'automobile, développèrent également. Toutes ces mutations conduisirent à l'époque actuelle où, à côté des moyens de production classiques, se trouvent des outillages de plus en plus puissants et de plus en plus automatiques. La commande numérique, dont la généralisation dans l'industrie ne fait que commencer, ouvre déjà des horizons nouveaux à côté des Centres d'usinage, machines dont la vogue ne cesse de croître.

L'âpreté de la concurrence, la nécessité de diminuer le prix de revient, les exigences toujours plus grandes de la clientèle en ce qui concerne le rendement et la qualité, font que l'usinage par outils coupants tient, plus que jamais, une place de premier rang dans l'industrie actuelle. Cette place ne paraît pas en voie de diminution malgré le recours à d'autres méthodes de fabrication telles que le formage ou le moulage de pièces frittées qui sont étudiées dans d'autres chapitres et qui complètent simplement l'usinage classique dans certains domaines.

Ainsi qu'on l'a indiqué ci-dessus, l'usinage à la main tend de plus en plus à être remplacé par l'usinage à la machine; cette évolution serait encore plus rapide si les moyens en machines permettant de remplacer l'usinage manuel n'étaient encore trop onéreux dans beaucoup de cas, notamment pour les petits ateliers qui restent si nombreux à côté des grandes entreprises.

L'usinage à la machine a, sans aucun doute, pris une importance qui ne cessera pas de croître; les progrès dans la construction des machines, ainsi que dans leur conception, l'évolution correspondante de l'outillage et — ce qu'il ne faut pas oublier — l'adaptation continue des moyens de contrôle aux productions unitaires et de séries, sont la marque la plus nette de l'effort permanent accompli dans ce domaine.

CHAPITRE PREMIER
L'USINAGE À LA MAIN

Il est assez rare, à l'heure actuelle, qu'une pièce soit fabriquée entièrement à la main; presque toujours elle subit un usinage partiel à la machine. Toutefois, il peut arriver, que la simplicité des formes ou, au contraire, des difficultés d'usinage très spéciales, imposent un usinage total à la main.

Les opérations qu'il faut exécuter dans ce cas sont: le traçage, l'usinage proprement dit, enfin le contrôle.

1. LE TRAÇAGE

Bien que les opérations de traçage soient mentionnées dans ce chapitre, elles sont également nécessaires dans le cas de l'usinage à la machine.

Le traçage consiste à marquer sur la pièce, d'une manière claire et précise, les points et les lignes qui indiquent le chemin à faire suivre à l'outil pour réaliser l'usinage. La précision définitive dépend ainsi de la qualité du traçage qu'il importe de réaliser le mieux possible.

À cet effet, on utilise comme base de référence un marbre qui représente un plan XY; les marbres ayant la précision voulue se trouvent assez couramment dans le commerce car les moyens de les fabriquer sont bien connus actuellement. En particulier, la méthode classique est toujours utilisable: on prépare trois marbres, puis on les rode deux par deux afin de faire disparaître les aspérités qu'un contact entre deux marbres seulement pourrait laisser subsister. D'autres méthodes plus perfectionnées mettent en œuvre



Fig. I-1 — Trusquin à règle mobile (*Roch*)

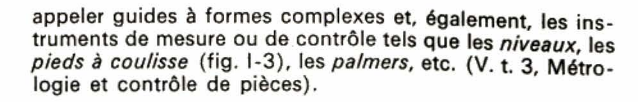


Fig. I-3

Pied à coulisse (*L.C.A.*)

des machines analogues à celles qu'on emploie dans le travail du verre ; dans ce cas, la surface du marbre est rodée avec des pierres animées de mouvements tels que chaque point de la pierre ne repasse jamais au même point de la surface du marbre.

Les points et les traits qu'il s'agit de tracer sur la pièce sont repérés par rapport au plan du marbre ; les distances à ce plan sont comptées perpendiculairement à celui-ci ; il faut donc utiliser des appareils permettant de reporter sur la pièce toutes ces distances.

À cet effet, on a longtemps employé et on emploie toujours un *trusquin* (fig. I-1), qui est un appareil composé d'un socle plat portant une tige verticale sur laquelle peut coulisser un bras terminé par une pointe dite pointe à tracer. Pour marquer un point sur la pièce, à une cote déterminée, on règle à l'avance la hauteur de la pointe à l'aide d'un moyen quelconque : règle graduée, cales, etc., puis on place le trusquin sur le marbre et, en déplaçant le socle, on amène la pointe à tracer au contact de la pièce. Ce procédé apparaît comme primitif et sans précision, a priori, mais l'expérience montre qu'on peut réaliser d'excellents traçages.

Les trusquins ont reçu, avec le temps, de nombreux perfectionnements ; l'un d'eux consiste à graduer la tige verticale de manière à repérer exactement la position du bras, cette graduation pouvant être assortie d'un vernier ; un autre perfectionnement consiste à donner au bras une rigidité suffisante pour que la pointe reste toujours à une hauteur déterminée quand le bras lui-même est à une hauteur indiquée par la graduation de la tige.

À côté de ces éléments fondamentaux, on utilise d'autres accessoires pour la réalisation d'opérations particulières. Parmi ceux-ci on trouve : les *équerres de traçage* (fig. I-2) qui permettent de tracer à partir de plans inclinés par rapport au marbre de base, les instruments qu'on peut appeler guides à formes complexes et, également, les instruments de mesure ou de contrôle tels que les *niveaux*, les *pieds à coulisse* (fig. I-3), les *palmers*, etc. (V. t. 3, Métrologie et contrôle de pièces).

Fig. I-2

Équerre de traçage (*L.C.A.*)

Le traçage s'effectue par les procédés les plus simples ; la pièce étant convenablement calée, on fait glisser le trusquin sur le marbre de manière à amener sa pointe à chaque endroit voulu. Si le traçage est exécuté dans un plan, on place celui-ci parallèlement au plan du marbre et l'on opère exactement comme pour l'exécution d'un dessin ; le traçage est dit à plat. Si l'on doit tracer dans des plans différents, ce qui est le cas le plus général, on part du plan, dit *plan principal*, qui est le plus important pour la pièce et on commence le traçage dans ce plan ; on continue ensuite à tracer en réglant le trusquin à la hauteur d'un plan parallèle à celui-ci et en marquant les points ou les lignes avec la pointe à tracer. Si le point à marquer correspond à un creux sur la pièce, on bouche ce creux avec une petite plaque de plomb fixée par matage sur les bords du creux et on marque le point sur cette plaque ; celle-ci est appelée *simbleau* (fig. I-4).

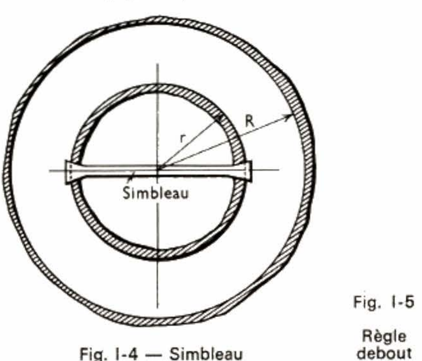


Fig. I-4 — Simbleau

Fig. I-5

Règle debout

Pour faciliter le traçage, on utilise divers appareils tels que équerres, règles dites « debout » (fig. I-5) parce qu'elles sont maintenues perpendiculairement au marbre, pieds à coulisse et compas de formes variées.

2. LES OUTILS D'USINAGE À MAIN

L'usinage à la main, comme on l'a indiqué ci-dessus, conduit à utiliser des outils relativement simples ; toutefois, cette simplicité n'exclut pas une certaine précision, notamment dans la fabrication et l'affûtage des arêtes coupantes. L'outil coupant, par excellence, est le burin ou le *bédane* que l'on utilise soit en le poussant à la main, soit, de préférence, en frappant sur la tête avec un marteau. Les trous peuvent être percés au vilebrequin avec des mèches spéciales et alésés avec des alésoirs spéciaux ; les alésoirs sont commandés à la main à l'aide d'un levier appelé *tourne-à-gauche* qui est constitué par une tige plate portant en son centre un ou plusieurs trous (fig. I-6) ; on fait pénétrer la



Fig. I-6 — Tourne-à-gauche à trois trous (*Archives Quillet*)

tête de l'alésoir qui a une forme carrée dans l'un de ces trous et l'on fait tourner le tourne-à-gauche qui agit à la façon d'une poignée. Il existe plusieurs variétés d'alésoirs parmi lesquelles on peut citer les alésoirs « façon Paris » taillés sur les deux tiers de leur surface et dont la précision n'est pas

très grande (fig. I-7), les alésoirs dits américains à cannelure droite ou hélicoïdale, plus précis (fig. I-8), les alésoirs expansibles à vis qui permettent une expansion de 0,01 à 0,02 mm pour adapter l'outil aux tolérances à respecter, les alésoirs à lames réglables (fig. I-9) qui permettent de faire varier le diamètre d'alésage de 20 %, les alésoirs coniques utilisés notamment pour retoucher les cônes Morse, l'ébauche et la finition s'effectuant avec deux outils distincts.



Fig. I-7 — Alésoir « façon Paris » (*Astra*)

Fig. I-8 — Alésoir américain à denture hélicoïdale (*Astra*)

Fig. I-9 — Alésoir expansible (*Astra*)

Les filetages ou les filières sont usinés avec des tarauds que l'on fait avancer également à l'aide du tourne-à-gauche. Certaines filières sont réglables et permettent de fileter plusieurs diamètres (filières Duplex).

Un outil toujours utilisé en vue des travaux de précision tels que l'usinage des glissières de machines-outils est le *grattoir* (fig. I-10) ; il se compose d'une lame très bien affûtée, d'environ 10 mm, placée à l'extrémité d'une tige droit ou recourbée (dans le deuxième cas on fait avancer la lame vers l'arrière) ; ces deux modèles ont chacun leurs adeptes. Certains gratteurs utilisent un grattoir monté sur un dispositif qui leur imprime un mouvement rapide de va-et-vient afin de supprimer l'action du gratteur.

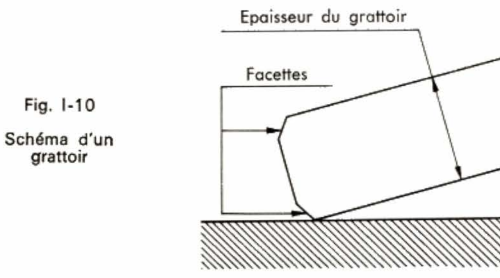


Fig. I-10

Schéma d'un grattoir

Malgré les progrès réalisés dans la rectification des glissières à la meule, le grattage est toujours considéré comme une opération pratiquement irremplaçable dans le cas des glissières de machines-outils de précision car il donne des surfaces géométriquement planes, unies, tout en conservant quelques différences microgéométriques qui permettent à l'huile de lubrification de rester en place.

Les *limes* constituent l'outil essentiel pour l'arrachement du métal ; à cet effet, on leur donne toutes les formes permettant de limer des surfaces planes, courbes, des trous, des rainures. On leur affecte des noms spéciaux : plate, ronde, tiers-point, carrée, feuille de sauge, etc. Les ajusteurs continuent à utiliser couramment des limes, dont certaines sont fabriquées avec assez de soin pour permettre des travaux de précision (fig. I-11).

Les ajusteurs se servent également de *meules* ou de pierres pour obtenir des surfaces polies ; les travaux ainsi effectués s'apparentent à ceux des diamantaires désireux d'obtenir des surfaces planes et brillantes lors de la taille de diamants.

Il ne serait toutefois pas exact d'affirmer que l'usinage dit manuel n'utilise aucune machine ; en fait certaines machines, notamment celles dites « portatives » ou d'« établi » sont très souvent utilisées, notamment pour le perçage et la rectification. Il existe de très nombreux modèles de perceuses dites d'établi qui peuvent être installées sur des établis à côté des étaux ; leur capacité de perçage est, en général, relativement faible, mais suffisante pour la grande majorité des travaux dits usuels (fig. I-12).

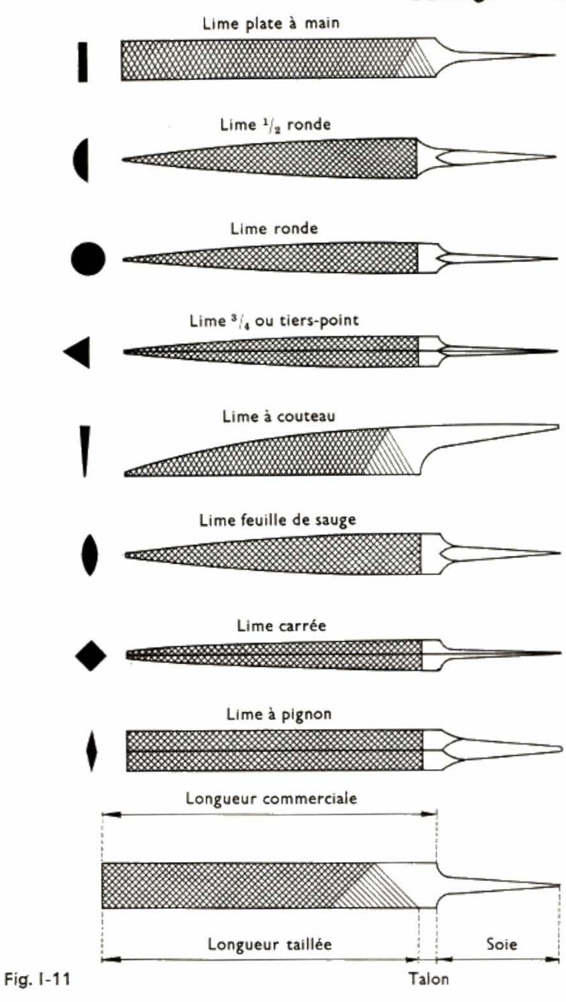


Fig. I-11

De même, les machines dites à meuler, portatives, sont très fréquemment utilisées pour la réalisation des travaux qu'un simple grattage à la pierre ne permettrait pas. Mais il convient de signaler que les machines portatives de cette nature n'ont jamais été considérées comme entrant dans la catégorie des machines-outils, comme on le verra plus loin.

Il est inutile de rappeler que l'usinage manuel peut toujours être complété par un usinage à la machine et inversement ; dans les ateliers artisanaux munis de machines parfois usées et peu précises, la finition de l'usinage est souvent manuelle.

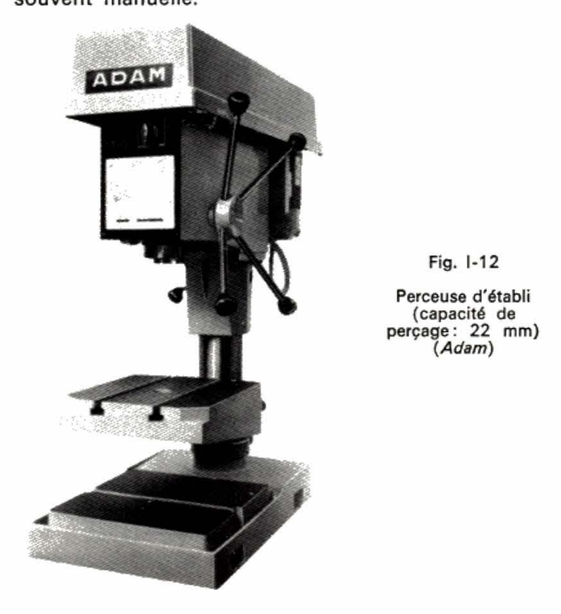


Fig. I-12

Perceuse d'établi (capacité de perçage : 22 mm) (*Adam*)

CHAPITRE II
L'USINAGE À LA MACHINE

1. DÉFINITION

Il importe de bien préciser qu'une machine-outil n'est qu'un intermédiaire entre l'outil de coupe et la pièce à usiner; c'est donc sous cet aspect d'intermédiaire que la machine-outil doit être considérée.

La machine imprime à l'outil les mouvements nécessaires à son utilisation; ces mouvements sont soit des translations, soit des rotations, soit une combinaison de translations et de rotations. Ces mouvements sont plus ou moins rapides suivant la nature du métal constituant la pièce à usiner et suivant la forme de cette pièce.

La machine fournit à l'outil la puissance nécessaire à l'exécution de l'usinage. Cette puissance varie, pour les raisons indiquées ci-dessus, suivant la nature du métal et la forme de la pièce à réaliser.

Ces deux conditions montrent que la machine-outil doit remplir une fonction cinématique: réalisation de mouvements donnés, et une fonction dynamique: fourniture d'une puissance déterminée. Ces deux fonctions se concilient en général, mais sont parfois contradictoires: c'est pour les réunir aussi exactement que possible que les constructeurs sont amenés à respecter certaines règles de conception et à employer certaines méthodes de fabrication et de montage. Compte tenu de ces explications, il paraît utile de rappeler que la définition d'une machine-outil a été précisée en France, en octobre 1969, dans une norme dite expérimentale, qui constitue une introduction de fait à une nouvelle norme de classification des machines-outils; la création de nouveaux modèles de machines-outils imposait, en effet, une refonte complète de l'ancienne norme de classification.

La définition adoptée est la suivante: *une machine-outil est une machine généralement non portative en travail, actionnée par une source d'énergie et destinée à façonner des produits à l'aide de procédés mécaniques, physiques, chimiques ou autres. Le façonnage, qui porte sur des matériaux à l'état solide: métal, bois, verre, plastique, etc., peut s'effectuer aussi bien avec ou sans enlèvement qu'avec ou sans apport de matière ou de produit.*

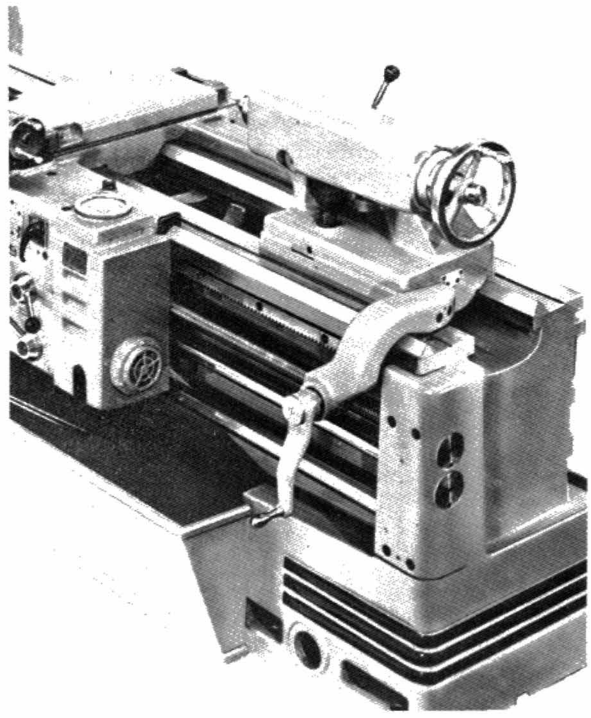


Fig. II-1 — Extrémité d'un banc de tour montrant les guidages (*Sculfort*)

Cette définition n'est peut-être pas parfaite; elle a, toutefois, le mérite de préciser d'une manière assez claire ce qu'on entend par machine-outil. Il est pourtant utile de la compléter par quelques commentaires. Par exemple, dans une machine-outil, l'outil n'est pas tenu à la main pendant l'opération de façonnage; une exception peut, toutefois, être signalée en ce qui concerne le tour à repousser dans lequel la pièce fixée sur le tour reçoit un mouvement de rotation, alors que l'opérateur appuie sur elle un outil destiné à lui donner la forme définitive (V. t. 3, Repoussage).

De même, la pièce n'est presque jamais tenue à la main pendant le travail. L'usinage peut être exécuté sur une matière chauffée, mais si elle est à l'état liquide, la machine utilisée n'est pas une machine-outil.

Dans un autre ordre d'idées, les machines d'essais ou de vérification faisant partie d'une chaîne de fabrication ne sont pas considérées comme des machines-outils; en revanche, les machines d'assemblage de produits mécaniques rentrent dans cette catégorie. Une machine destinée à déceler un défaut d'équilibre n'est considérée comme une machine-outil que si elle est aussi conçue pour corriger le défaut.

2. LES MOUVEMENTS D'UNE MACHINE-OUTIL

Revenant sur les définitions précédentes, on constate qu'une machine-outil doit avoir des éléments aptes à réaliser des déplacements de translation et de rotation. Suivant les cas, la pièce est immobile, fixée sur un chariot, ou elle est animée de mouvements produits par le déplacement du chariot lui-même ou elle est entraînée dans un mouvement de rotation (ce qui permet de réaliser des formes dites de révolution). Il est assez rare que la pièce et l'outil soient animés des mêmes mouvements, mais il est bien évident que pour usiner toutes les parties d'une pièce, l'outil doit pouvoir être déplacé par rapport à celle-ci. Quant aux outils eux-mêmes, ils peuvent être fixes comme les outils de tours ou de raboteuses, ou bien tournants comme les fraises ou les meules; la rectification est à peu près le seul cas où l'on usine une pièce en rotation au moyen d'un outil en rotation.

Pour être matérialisés, les déplacements de translation et de rotation demandent des précautions particulières.

2.1. La translation. — Elle est presque toujours obtenue en faisant glisser deux surfaces l'une sur l'autre. Ce glissement doit avoir lieu dans une direction bien déterminée, suivant une ligne droite et non sous forme de mouvements oscillants (lacets); cette obligation impose la nécessité d'un guidage de la pièce qui se déplace par rapport à une pièce fixe (fig. II-1). La pièce qui se déplace est, par exemple, une table portant des outils, alors que la pièce fixe est le bâti de la machine elle-même, ou plus exactement une glissière de ce bâti. Il faut donc que la table se déplace en prenant appui sur la glissière d'une manière telle que le mouvement de translation rectiligne soit bien guidé. De nombreuses théories ont été établies à ce sujet: celle qui parait réunir le plus de suffrages est celle du guidage dit étroit. D'après cette théorie, la glissière qui guide le mouvement de la table doit être aussi étroite que possible pour se rapprocher d'une simple ligne droite qui est le guide idéal évidemment. Les glissières utilisées autrefois étaient plates et le guidage s'effectuait par le côté situé dans la direction de l'ouvrier, mais il arrivait souvent que la table ne s'appuyait plus sur ce côté et elle n'était plus guidée. Une solution, de beaucoup la plus préférable, est celle des guidages prismatiques; le banc porte sur sa partie supérieure et sur toute sa longueur un élément dont la coupe verticale a la forme d'un prisme. La table à guider présente un élément en creux qui s'ajuste sur l'élément du banc de telle sorte que tout mouvement louvoyant est rendu impos-

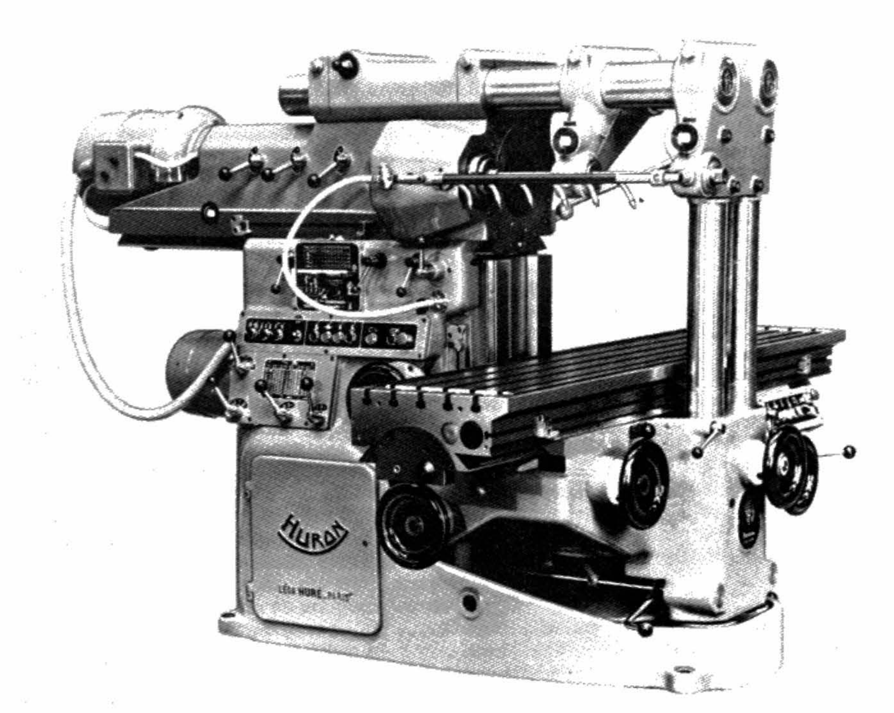


Fig. II-2

Fraiseuse horizontale ; on voit le risque de porte-à-faux de la table non soutenue en fin de course (*Huré*)

sible. Lorsque le banc comporte deux glissières, la glissière arrière a souvent une forme plane et la table peut reposer sur celle-ci de manière à éviter tout entraînement vers le bas ; cette glissière arrière porte parfois un élément prismatique qui sert au guidage de pièces telles que les contrepointes. En revanche il est très rare qu'on utilise un double guidage prismatique pour une table ; son utilité n'est pas évidente et il peut engendrer des coincements inutiles.

Une difficulté se présente également lorsque la pièce mobile avance et n'est plus supportée que partiellement par le bâti. Le mouvement de translation, même s'il est bien réglé sur le plan horizontal et ne comporte pas de lacets, peut n'être plus rectiligne dans le sens vertical si la flexion de la table mise en porte-à-faux infléchit les mouvements vers le bas. Cette situation se présente notamment pour les tables de raboteuses, de fraiseuses et d'aléseuses arrivant en fin de course sans être soutenues et il importe soit de limiter les déplacements des tables soit de veiller à ne placer sur elles que des charges assez légères pour éviter des flexions importantes (fig. II-2).

2.2. La rotation. — Les mouvements de rotation nécessitent des méthodes de construction particulièrement délicates. Un mouvement de rotation est, en effet, susceptible d'être altéré de plusieurs manières que l'on englobe sous le terme général de *faux-rond*. Il existe plusieurs catégories de faux-ronds :

a) la pièce tournante n'a pas une forme régulière ;

b) l'axe de rotation et l'axe de la pièce sont parallèles mais non confondus ;

c) l'axe de la pièce et l'axe de rotation sont obliques l'un par rapport à l'autre et peuvent ou non se trouver dans le même plan (la catégorie *b* est un cas particulier de la catégorie *c*).

Les pièces qui devraient être de révolution n'ont pas la forme désirée en cas de rotation défectueuse ; par exemple, au lieu d'une circonférence comme section droite, on peut obtenir une courbe à diamètres constants dans laquelle les diamètres conservent la même valeur, mais ne passent pas par un centre commun.

Certains des cas où l'on rencontre des mouvements de rotation sont relativement simples ; par exemple, ainsi qu'on le verra en décrivant des tours, une pièce à tourner est prise par ses extrémités entre deux pointes ; sa rotation lui est imprimée à partir de l'une des pointes par un dispositif qui reçoit le mouvement d'un moteur, l'autre pointe servant seulement de support. L'outil se déplace, en général, selon une direction parallèle à la ligne des pointes ; il faut donc que l'axe de la pièce soit également parallèle à cette direction. Une erreur en hauteur est considérée comme peu importante ; en revanche, une erreur en direction dans le plan horizontal, que l'on appelle parfois *obliquité transversale*, peut entraîner des défauts sérieux dans l'usinage.

D'autres mouvements de rotation sont ceux qui animent les broches, par exemple les broches porte-outils pour outils tournants ou les broches de tours ou de rectifieuses qui transmettent leur mouvement aux pointes (fig. II-3). Les

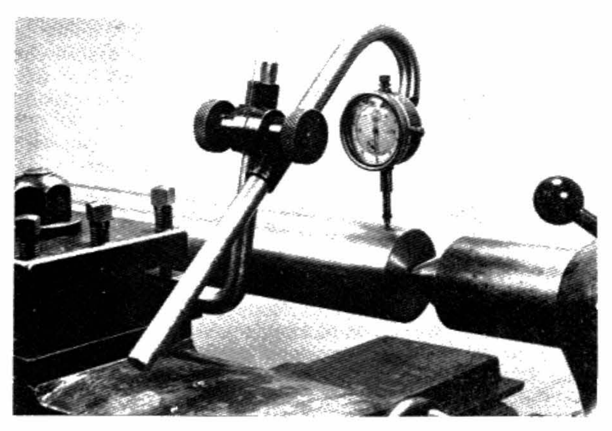


Fig. II-3 — Contrôle du mouvement de rotation d'une broche (*Roch*)

erreurs à craindre sont évidemment celles de faux-rond déjà signalées ci-dessus ; on peut y ajouter l'erreur de translation parallèle à l'axe de rotation qui provient de ce que les butées de la broche n'ont pas leurs faces d'appui exactement planes et perpendiculaires à l'axe de la broche. On dit qu'elles ont un *voile*. Chaque rotation crée ainsi un ou même plusieurs mouvements que l'on appelle *déplacements axiaux*.

Le même défaut peut être causé par le voile de la face d'appui du plateau.

Dans un autre ordre d'idées, la question des paliers et des coussinets pose des problèmes de précision qui apparaissent sur les machines de grande qualité. La rotation des axes sur les portées a imposé de rechercher les moyens d'éviter le frottement métal sur métal qui amène presque toujours des grippages ; jusqu'à un certain point on peut éviter ceux-ci au moyen d'une lubrification abondante afin d'in-

terposer un film d'huile entre les parties venant en frottement. Mais l'expérience a montré d'une part que l'épaisseur de ce film était rarement constante, d'autre part que l'élévation de température causée par la marche de la machine faisait varier la fluidité du lubrifiant. La position de la broche au début du travail n'est donc pas la même qu'après un certain temps de travail. L'utilisation d'antifriction a amélioré les défauts dus aux grippages, mais n'a pas supprimé les variations de position de la broche en raison de l'échauffement de la machine. L'emploi des roulements à billes a apporté également une amélioration certaine à la rotation des broches, mais ce système lui-même est sujet à des défectuosités telles que l'échauffement qui n'a pas complètement disparu. On ne sait pas d'ailleurs encore exactement quelle est la résistance des roulements aux efforts d'écrasement qui leur sont imposés pendant la marche de la machine. Il est curieux de constater, à ce sujet, que toute la question des roulements apparaît comme un privilège de la Suède et ce privilège est assez sévèrement gardé. C'est pourquoi, en France, le Centre d'Études et de Recherches de la Machine-Outil (C.E.R.M.O.) a considéré qu'il lui fallait absolument reprendre cette étude depuis le début et la poursuivre au moyen de très nombreuses expériences; celles-ci sont en cours. Par ailleurs, à l'heure actuelle, les mécaniciens fondent de très grands espoirs sur les paliers dits fluides (V. t. 3, Étude des constructions, chap. 5, § 3.3). Dans ce cas, les broches reposent sur les coussinets par l'intermédiaire d'un fluide, air ou gaz, dont il convient de régler la quantité et la pression en fonction de la température de manière à conserver exactement les cotes de la broche par rapport à l'ensemble de la machine.

Les paliers eux-mêmes font l'objet de nombreuses recherches; certains d'entre eux entourent complètement la broche alors que d'autres sont en contact avec elle par trois points seulement (paliers triangulaires). On pourrait également évoquer le cas des paliers hydrauliques dans lesquels le fluide reste immobile et celui des paliers hydrodynamiques dans lesquels le fluide circule. Les définitions et les réalisations sont actuellement en état d'évolution constante dans ce domaine; on peut en chercher l'une des raisons les plus importantes dans le développement de l'emploi des commandes numériques. Tout obstacle à la cinématique des mouvements risque de compromettre la régularité et la constance de ceux-ci lorsqu'ils se produisent sous l'action d'une commande numérique dont l'un des avantages essentiels est précisément d'apporter un fonctionnement toujours semblable à lui-même.

Revenant sur l'utilisation des fluides, on peut citer l'emploi de cette technique pour la réalisation de glissières sans frottements. Depuis les premiers essais de cette technique, les résultats paraissent assez concluants pour que le procédé prenne une extension de plus en plus grande.

2.3. Les parties fixes. — La réalisation des mouvements de translation et de rotation des éléments utiles d'une machine-outil ne doit pas être seule prise en considération. En ce qui concerne ce qu'on appelle les parties fixes, il faut tenir compte de nombreuses variables qu'il importe d'étudier.

Les parties fixes, qui sont l'ensemble des bâtis et de leurs accessoires, doivent pouvoir résister aux efforts que la coupe impose; ces efforts sont souvent beaucoup plus importants qu'on le croit et produisent des effets inattendus. On conçoit que les efforts de la coupe réagissent sur l'ensemble des liaisons, mais on aperçoit moins bien l'origine des chocs et surtout des vibrations que l'on constate sur certaines machines-outils.

Les bâtis doivent résister à diverses sollicitations (rotation des moteurs, efforts développés par la coupe) et ils doivent être conçus en fonction des liaisons qui les rattachent aux organes de transmission des moteurs, à ceux qui supportent les outils et à ceux qui supportent les pièces. Ces sollicitations engendrent des menaces de rupture qui sont assez difficiles à prévoir, excepté sur les pièces de liaison (poupées et pointes, broches porte-outils). Elles engendrent aussi des variations de température qui causent des dilatations pouvant parfois altérer la précision de la machine; la prise en considération de ces dilatations est l'un des problèmes qui se posent actuellement avec une acuité très grande. Les constructeurs les plus dynamiques s'efforcent de mettre en œuvre des correcteurs automatiques de dilatation qui semblent devoir être, dans l'avenir, l'une des révolutions les plus importantes dans la conception des machines de précision. Les sources de chaleur sont d'ailleurs multiples; il y a le point de contact de l'outil et de la pièce d'où la chaleur se propage dans le porte-outils et dans les autres liaisons (broche, par exemple); il y a également le moteur et les organes d'entraînement qu'on appelle la chaîne cinématique (qui transmet la rotation aux différents éléments intéressés et transforme éventuellement la rotation en translation). De plus la transmission du mouvement doit tenir compte des variations de vitesses rendues nécessaires par les exigences de la coupe. Parfois les sources de mouvement sont multiples, ce qui est le cas lorsqu'un moteur est affecté à chaque déplacement, mais il est très difficile de ne pas mettre en œuvre des trains d'engrenages qui sont inévitablement appelés à s'échauffer. C'est l'une des supériorités des constructeurs de grande classe de concevoir des chaînes cinématiques aussi simples que possible.

Les sources de vibrations sont également très nombreuses. Des vibrations sont engendrées par les trains d'engrenages d'une manière presque inévitable, malgré les grands progrès qui ont été réalisés dans leur fabrication. Il serait évidemment avantageux de remplacer les engrenages par d'autres dispositifs, par exemple électrotechniques, comme l'expérience en a été faite dans certains domaines (conduite des navires par exemple); il est possible qu'une telle solution soit retenue dans l'avenir, mais, pour l'instant, on s'est attaché surtout à réduire le nombre d'engrenages et également à harmoniser leur inertie, c'est-à-dire à ne pas monter sur un même arbre des engrenages de poids très différents. D'une manière assez générale, les vibrations provenant d'une telle erreur deviennent très réduites du fait des progrès techniques dans ce domaine.

La coupe ne peut manquer de causer des vibrations toutes les fois qu'une inégalité se présente dans la forme de la pièce: grains durs, ressauts, rainures. Ce sont des causes assez difficiles à éliminer. Par ailleurs, l'outil peut s'émousser ou s'ébrécher; s'il est composé de plusieurs arêtes de coupe, comme c'est le cas pour les fraises, il suffit que l'une des arêtes soit altérée pour qu'un mouvement de vibration se produise.

Parmi les causes de vibrations, on peut également citer d'une part la masse insuffisante des bâtis qui rend ceux-ci sensibles à toute modification de la marche normale de la coupe, d'autre part, la forme de ceux-ci qui conduit parfois à faciliter l'amplification de vibrations assez faibles à l'origine. Cependant, ce domaine est assez mal connu étant donné les formes très variées des machines; il semble que ce soit surtout pour les tours automatiques de dimensions assez faibles, pour lesquels la précision joue un rôle aussi grand que le rendement, que des études systématiques aient été faites par les constructeurs intéressés. Ce sont des stroboscopes ou, plus généralement, des oscillographes qui ont été le plus souvent employés; les anomalies décelées, notamment par les courbes d'enregistrement des vibrations, ont été presque toujours corrigées par empirisme car l'emploi de formules mathématiques ne s'est que très rarement révélé utile en pratique.

Un des moyens les plus simples pour corriger les trois défauts énumérés ci-dessus est d'adopter des bâtis suffisamment lourds; c'est l'une des raisons de l'intérêt qui ne cesse d'être porté à l'emploi de la fonte. Toutefois, on ne peut aller trop loin dans cette voie sous peine de donner aux machines des poids et des encombrements excessifs; les constructeurs cherchent donc à limiter cette masse au moyen d'approximations et en se livrant à des recherches empiriques souvent très intéressantes. Cependant, certains ont estimé avantageux de recourir à des bâtis soudés plus légers, plus faciles à réaliser et, en général, plus résistants. Il est certain que la fonte est une matière parfois fragile qui vieillit avec le temps et pour laquelle des précautions sont toujours indispensables, ne serait-ce que dans l'implantation de la machine (la fonte a tendance à se déformer toutes les fois qu'un porte-à-faux se présente). Aussi est-il nécessaire de veiller à cette implantation sans laquelle il serait difficile d'obtenir de la machine la précision voulue.

3. MATIÈRE CONSTITUTIVE DES MACHINES-OUTILS

Avant d'examiner les différents types de machines-outils, il est nécessaire de donner quelques informations sur leur matière première constitutive.

Ainsi qu'on vient de l'indiquer, les bâtis sont, en général, en fonte, de préférence fonte spéciale au nickel. Les compositions de cette fonte varient suivant les constructeurs et font l'objet de discussions techniques fréquentes avec les fondeurs. Les fontes sont souvent trempées de manière à permettre un usinage précis des glissières qui guident les mouvements des tables ; assez souvent aussi on rapporte sur le bâti des glissières en acier dur qui offrent, en plus, l'avantage de bien résister à l'usure, surtout dans le cas où de nombreuses poussières sont produites, ce qui arrive par exemple avec les machines à rectifier.

Les traînards, les chariots, les porte-outils, les supports de contrepointe, etc., sont, en général, en fonte comme le bâti lui-même ; les glissières de chariots sont rarement réalisées au moyen de bandes d'acier rapportées, étant donné que les déplacements longitudinal et transversal des porte-outils qu'ils supportent sont de peu d'amplitude et n'exigent pas une précision considérable.

En revanche, toutes les pièces dites « nobles » comme les broches, les arbres, etc., sont en acier trempé dur et rectifié ou en acier allié ; en effet, la précision qu'il faut atteindre grâce à un usinage soigné de ces pièces impose de pouvoir les rectifier et de leur donner un excellent état de surface ; de plus, leur résistance à la rupture et, jusqu'à un certain point, aux flexions, impose des caractéristiques très bonnes.

4. LES ÉTUDES DES OUTILS

Les études effectuées sur les machines-outils ont été longtemps laissées à l'appréciation du personnel d'exécution ; c'est ainsi que, pendant longtemps, certaines traditions se sont perpétuées, comme le guidage des tables ou des chariots au moyen de glissières planes. C'est également à la suite d'observations répétées, effectuées à l'atelier, que l'on est venu peu à peu aux glissières prismatiques ; on ne saurait donc en aucune manière contester l'intérêt des remarques effectuées quotidiennement par les utilisateurs des machines-outils.

Les améliorations qu'il a été reconnu nécessaire d'apporter à la conception et à la fabrication des machines-outils ont entraîné un recours de plus en plus accentué à des méthodes autres que la mécanique, en même temps qu'à des études scientifiques et techniques dont il est fait état plus loin. Les résultats de ces recherches sont une conception parfois révolutionnaire de la forme des machines et l'emploi de l'hydraulique, de l'électrotechnique et, surtout, de l'électronique, notamment dans les transmissions et les contrôles. Les conceptions nouvelles des formes sont visibles, par exemple, sur les machines dites centres d'usinage qui, portées à un degré de perfectionnement poussé, ne ressemblent plus que de loin à des aléseuses ou à des aléseuses-fraiseuses. Les machines-transferts nouvelles, plus ramassées que les anciennes, offrent des moyens d'usinage multiples qu'on n'envisageait pas jusqu'à présent. Quant aux automatisations et aux transmissions, elles ont considérablement progressé. Les échanges automatiques d'outils se répandent de plus en plus, malgré une défiance assez nette dans les débuts de leur utilisation. Mais c'est évidemment la commande numérique qui représente la technique d'avenir la plus riche en résultats. Cette technique sera étudiée plus loin, mais on peut déjà rappeler qu'elle permet d'utiliser des machines conçues pour exécuter des travaux unitaires, afin de réaliser des séries dans de bonnes conditions. De plus, par la suppression de l'intervention humaine, elle garantit un usinage constant, indépendant de toute variation extérieure.

Les outils ont fait l'objet d'études beaucoup plus poussées que les machines elles-mêmes car il est beaucoup plus facile de les apporter dans les laboratoires pour qu'ils soient soumis à des essais. L'étude de l'élévation de température à la pointe d'un outil peut être réalisée avec facilité dans un laboratoire, alors que l'évolution de la température dans la totalité d'une machine-outil conduit à des installations complexes et donne rarement des résultats définitifs.

En examinant, d'ailleurs, le problème général de l'outillage, on voit qu'il est relativement facile d'étudier les formes des outils, leur résistance et, comme on vient de l'indiquer, l'influence de facteurs physiques tels que les échauffements, les vibrations, les flexions. Toutes les observations effectuées par les utilisateurs d'outils ont permis d'arriver à des résultats d'ordre pratique extrêmement intéressants. Mais les exigences incessantes de l'usinage ne peuvent plus dispenser de compléter ces observations par des études théoriques et des essais de laboratoire.

En définitive, quel que soit l'intérêt d'une machine-outil par elle-même, c'est l'outillage, on ne saurait trop le répéter, qui représente l'essentiel de l'usinage. La prise en considération de l'outil joue donc un rôle particulièrement important. Il est curieux de constater que, malgré les travaux effectués par de nombreux chercheurs et malgré la solidité apparente de théories anciennes et éprouvées, certains procédés en apparence paradoxaux se sont révélés parfois plus efficaces que les méthodes classiques. C'est le cas, en particulier, du fraisage « en avalant » et de la coupe négative. On est donc amené à être très prudent dans un tel domaine. On se contentera, pour les raisons indiquées ci-dessus, d'exposer des théories assez simples sur la coupe.

Lorsqu'il s'agit d'usinage par enlèvement de métal, les outils employés doivent être conçus pour couper la matière constituant la pièce à réaliser ; cette opération produit ce qu'on appelle un copeau qui représente la matière enlevée par l'outil. Toutefois, à part de rares exceptions, lors de la formation du copeau, il n'y a pas simplement un coupage, il y a aussi un arrachement de matière et une élévation de température. Tout l'art de l'opérateur consiste à obtenir que l'effet le plus important produit soit la formation d'un copeau, cela avec le minimum d'arrachement de métal et avec une élévation de température de la pièce et de l'outil aussi faible que possible.

Pour enlever le métal, on peut utiliser un outil ayant une seule arête ou, au contraire, plusieurs arêtes de coupe ; dans la première catégorie, on range la plupart des outils fixes (à l'exception des alésoirs), et, dans la deuxième catégorie, à peu près tous les outils tournants. Toutes les fois qu'on le peut, il y a intérêt à utiliser des outils à arêtes de coupe multiples car le rendement est, en général, bien meilleur. Mais, en contre-partie, un tel outil est toujours plus difficile à fabriquer et à entretenir et son prix est plus élevé. Il en résulte une tendance à un moindre emploi de procédés d'outillage, tels que le brochage, nécessitant l'emploi d'outils à un nombre d'arêtes très élevé, en raison de leur prix et des dangers d'altération.

4.1. Les outils à une seule arête. — En première analyse, pour examiner un outil, on peut partir d'un modèle à une seule arête et reporter plus loin l'étude de sa matière première constitutive.

En général, l'arête est affûtée de manière à affecter la forme d'un couteau ; elle doit répondre à certaines conditions : pénétrer dans la matière à usiner, éviter un contact avec la pièce une fois le copeau en cours de formation, permettre le dégagement du copeau. Ces caractéristiques s'expriment essentiellement en angles ; afin d'obtenir des définitions identiques, les caractéristiques dont il s'agit ont fait l'objet de normes ou de projets de normes ainsi que de recommandations ou projets de recommandations de l'Organisation Internationale de Normalisation (I S O). Toutefois, ce travail d'unification n'est pas encore terminé et les définitions qui ont été retenues pour l'instant ne sont pas toutes définitivement adoptées. C'est la raison pour laquelle les définitions, de quelque origine qu'elles soient, peuvent toujours être contestées.

Dans le cas de l'outil le plus simple qui fait l'objet de cette étude, on retiendra les définitions suivantes :

— On appelle *plan de base* le plan *CC DD* opposé au plan contenant l'arête *A* ; pour que l'outil ne frotte pas contre la pièce pendant l'usinage, il faut que le plan *AA EE* contenant l'arête *AA* et passant par une droite *EE* contenue dans le plan *CC DD* soit légèrement en retrait du plan *AA DD* perpendiculaire au plan *CC DD* ; ce retrait est matérialisé par l'angle α qu'on appelle *angle de dépouille* (V. fig. II-4).

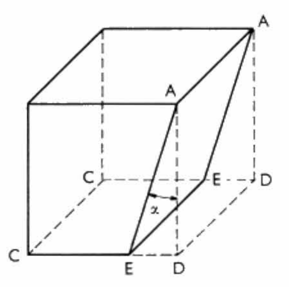


Fig. II-4 — Angle de dépouille (α)

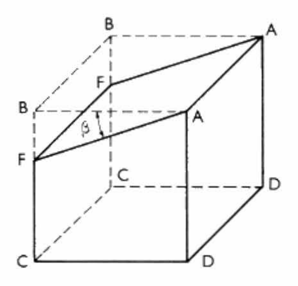


Fig. II-5 — Angle d'affûtage (β)

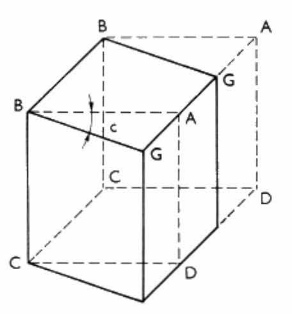


Fig. II-6 — Angle de direction (c)

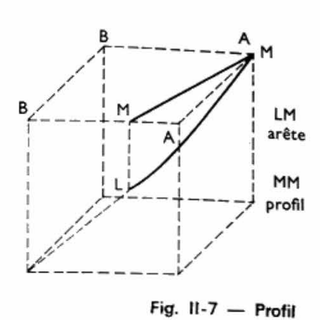


Fig. II-7 — Profil

— Pour permettre à l'outil d'être réellement coupant, il faut que le plan *AA FF* soit décalé par rapport au plan *AA BB*, passant par l'arête *A* et parallèle au plan *CC DD* ; ce décalage est mesuré par l'angle β qu'on appelle *angle d'affûtage* (fig. II-5).

— L'outil peut s'infléchir à droite ou à gauche pour des commodités d'emploi ; on considère la ligne de plus grande pente de la surface *AA DD* au voisinage de l'arête et on fait passer par cette ligne un plan perpendiculaire au plan *CC DD*. On considère, de plus, un plan perpendiculaire au plan *CC DD* et parallèle aux génératrices du corps d'outil. L'angle *c* de ces deux plans est appelé *angle de direction* (fig. II-6).

Autres définitions. — On appelle :

- *profil*, la projection de l'arête *LM* sur le plan *AA BB* ; la considération du profil est intéressante lorsque l'arête n'est pas rectiligne (fig. II-7) ;
- *pente effective de coupe* θ, l'angle que fait avec le plan de base la section de la surface d'attaque par un plan perpendiculaire au profil et au plan de base (fig. II-8) ;
- *obliquité d'arête* l'angle ω que fait l'arête avec le plan de base (fig. II-9) ;
- *obliquité de profil* l'angle γ que fait un plan perpendiculaire au profil avec une parallèle aux génératrices du corps de l'outil (fig. II-10).

On démontre facilement que les valeurs θ, ω, β, *c*, γ, sont liées par les formules suivantes :

$$\text{tg}\ \theta = \text{tg}\ \beta \cos\ (c - \gamma)$$

$$\text{tg}\ \omega = \text{tg}\ \beta \sin\ (c - \gamma)$$

Quant au tranchant de l'outil, il est égal à 90° — α — θ. Ces formules restent théoriques et ne valent que par leur application à des cas bien précis ; en effet, les valeurs de α et β notamment varient suivant qu'il s'agit d'ébauche ou de finition de matière plus ou moins dure. Le tableau ci-après représente des solutions acceptables mais non exclusives.

Matériaux à usiner	Outils en acier rapide		Outils en carbure métallique	
	β	α	β	α
Acier doux $R < 50$ hbar (1)	25°	6°	20°	6°
Acier demi-dur R ⩽ 80 hbar	15°	6°	15°	6°
Acier dur $80 < R < 100$ hbar	5°	6°	12°	5°
Acier trempé	—	—	5°	5°
Fonte grise ordinaire	15°	6°	15°	5°
Acier moulé	10°	6°	10°	5°
Fonte dure	5°	6°	0 à 4°	5°
Alliages légers	25 à 30°	8°	20°	8°
Cuivre rouge	30°	8°	20 à 25°	8°
Bronze ordinaire	15°	8°	10 à 15°	8°
Laiton ordinaire	15°	8°	15°	8°
Laiton de décolletage	15°	8°	10 à 15°	8°
Alliage léger de décolletage	0 à 5°	6 à 8°	0 à 5°	6°

(1) 1 hectobar (hbar) correspond sensiblement à 1 daN/mm².

L'arête coupante d'un outil possède évidemment deux extrémités dont l'une au moins se trouve en contact avec la pièce (parfois même les deux extrémités se trouvent en contact) ; le point ou les points correspondants sont

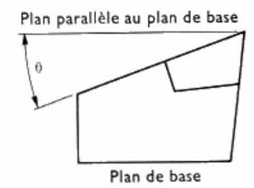


Fig. II-8 — Pente effective de coupe

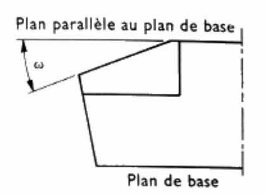
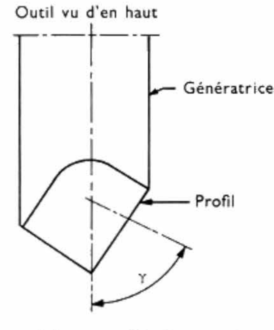


Fig. II-9 — Obliquité d'arête



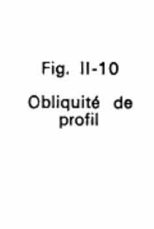


Fig. II-10

Obliquité de profil

parfois appelés becs. En général les becs ne sont pas en forme de pointe et ils présentent un arrondi dont l'importance peut être assez grande dans un certain nombre de cas, notamment lorsque les vitesses de coupe varient. S'il est bien adapté à la coupe, on admet que le rayon du bec peut diminuer la fragilité de l'outil ; sa valeur augmente lorsque la profondeur de passe augmente. Toutefois, le bec laisse des traces sur la pièce, de telle sorte que sa valeur doit être contrôlée dans le cas de travaux de finition (fig. II-11). En principe, le bec laisse une trace en forme d'hélice dont

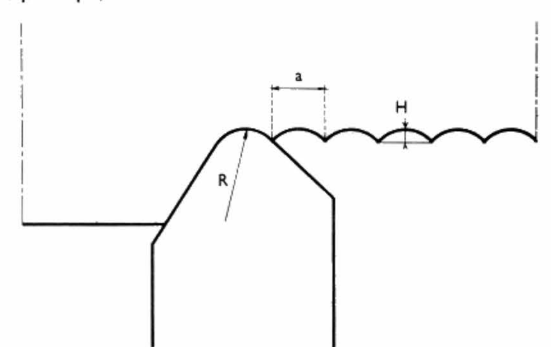


Fig. II-11 — Profondeur des traces sur une pièce usinée

le pas est égal à l'avance. Le profondeur de ces traces paraît être assez bien représentée par la formule :

$$H = \frac{a^2}{8R} \qquad (R\text{ : rayon du bec})$$

Les outils dont il vient d'être question sont essentiellement des outils de tour ; ceux qui sont utilisés pour le rabotage ou le mortaisage leur sont assez semblables. Pour les rabotages, cependant, l'outil comporte un dégagement latéral plus prononcé afin de faciliter l'évacuation des copeaux.

4.1.1. Les outils monoblocs et les outils à plaquette rapportée. — Les outils décrits ci-dessus peuvent être monobloc ou à plaquette rapportée.

Les outils monobloc sont les plus simples à fabriquer; il suffit de partir d'une barre forgée et de procéder à un affûtage; la barre est, en général, traitée.

Mais lorsqu'on exige de l'outil des qualités particulières, il serait déraisonnable d'utiliser un outil monobloc dont la plus grande partie, inutilisée pour la coupe, entraînerait des dépenses inutiles. On a donc cherché à réaliser des outils dont la tige soit simplement en métal résistant et dont la partie coupante soit limitée à un élément relativement réduit en dimensions. À cet effet, on pratique à l'extrémité de l'outil un évidement que l'on comble avec une plaquette (on emploie aussi le terme pastille); cette plaquette épouse exactement les formes d'une extrémité d'outil, s'affûte comme lui et exécute le même travail (fig. II-12). Dans les premiers temps, les plaquettes étaient fixées sur les corps d'outils par brasage, ce qui rendait leur remplacement impossible ou, tout au moins, très difficile. On s'est attaché ensuite à les fixer d'une manière mécanique telle que leur enlèvement et leur remplacement soient facilement réalisables.

Plusieurs considérations sont à examiner dans ce montage: tout d'abord, il faut que l'outil conserve les mêmes dimensions lorsqu'on change la plaquette, surtout lorsque ce changement a lieu en cours d'usinage car, dans le cas contraire, tout le réglage de la fabrication est à refaire. Pour obtenir ce résultat, on utilise souvent un gabarit; il permet de s'assurer que l'outil muni d'une nouvelle plaquette conserve exactement ses formes antérieures. Pour des outils de finition, comme les alésoirs, certains fabricants d'outils utilisent aussi des dispositifs spéciaux de réglage qui permettent d'avancer ou de reculer la plaquette dans son montage en suivant les indications d'un index sur un cadran et de placer exactement la plaquette à sa position définitive (par exemple au moyen d'une tige entrant dans un logement).

Ensuite, on doit veiller à fixer la plaquette dans son logement de manière à ce qu'elle ne puisse pas se déplacer; à cet effet, on peut introduire dans le logement un support en forme biseautée pour la soutenir; parfois même une simple vis suffit (fig. II-13).

Il semble que la vogue des plaquettes rapportées mécaniquement et enlevables soit actuellement assez grande. On appelle parfois ces plaquettes « plaquettes à jeter », ce qui est la traduction du terme américain « *throw away* » et signifie bien que la plaquette, ne pouvant plus être utilisée, lorsqu'elle a été affûtée un certain nombre de fois, doit être enlevée et remplacée par une plaquette neuve.

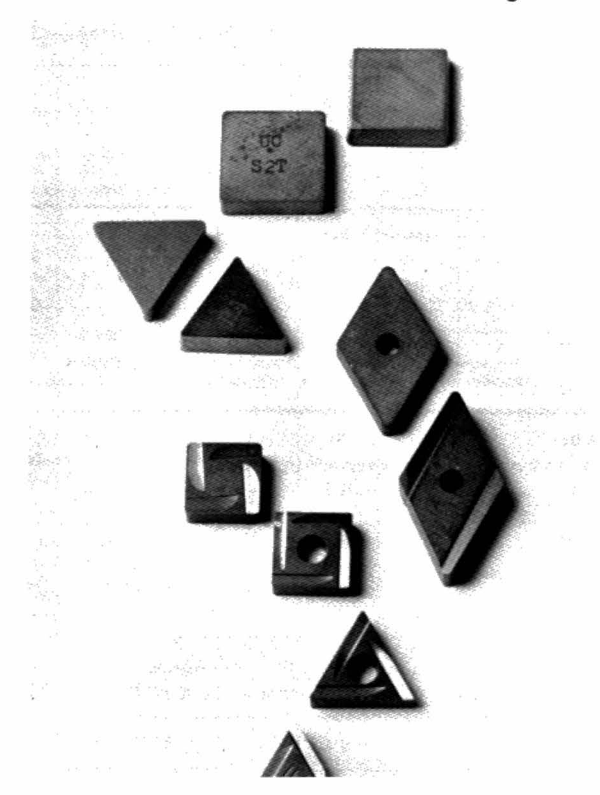


Fig. II-12 — Variété de plaquettes (*Photopress — Ugine-Carbone*)



Fig. II-13 — Outil à plaquette; celle-ci est fixée par une vis dans un logement (*Ugine-Carbone*)

Tableau A — Plaquettes en carbures métalliques

Tableau (1) de nuances de carbures métalliques classées dans le cadre des groupes d'application ISO

Groupes d'application ISO	Alliages durs (Alpamet)	Alliages métalliques	Aubert et Duval (Adram)	Bocuze et Cie	Creusot (Stellram)	Diacarb	Durmetal	Safety	Sofamet (Widia)	Tungsto	Tykram	Ugine Carbone (Ugicarb)
P 01	—	—	—	—	S 0	—	S 0	—	TT 02 TT 03	—	TS 0	FM
P 05	XL 1	—	—	—	—	—	—	S 0	—	—	—	—
P 10	XL 2	S 1	R 32	A 1	S 1	DP 10	S 1	S 1	TT 10	T 1	TS 1	S 1T
P 20	XL 3	S 2	R 42	A 2	S 2	DP 12 DP 20	S 2	S 2	TT 20	T 2	TS 2	S 2T
P 25	XL 35	—	—	—	—	DP 23	S 23	V	TT 25	S 2 S	TS 25	—
P 30	XL 4	S 3	R 82	A 3	S 3	DP 30	S 3	S 3	TT 30	T 3	TS 3	S 3T
P 40	XL 5	S 4	R 101	—	S 4	DP 40	S 4	S 4	TT 40	T 4 et Inox	TS 35 TS 4	S 4T
P 50	—	—	R 112	—	S 6	6 006	S 6	S 6	TT 50	T 5 et T 75	—	—

Tableau A (suite) — Nuances de carbures métalliques

Groupes d'application I S O	Alliages durs (Alpamet)	Alliages métalliques	Aubert et Duval (Adram)	Bocuze et Cie	Creusot (Stellram)	Diacarb	Durmetal	Safety	Sofamet (Widia)	Tungsto	Tykram	Ugine Carbone (Ugicarb)	
M 10	UA	SU	—	—	GS 0	DM T	—	UA	AT 10	T P et T PA	$\overline{\text{TU 1}}$	U 1	
M 20	SU	—	RA	—	GS 1	DM U	U	UN	AT 20	—	$\overline{\text{TU 2}}$	VH U 2	
M 30	NC	—	RA	—	GS 2		—	Choc	—	—	—	—	
M 40	T	—	—	—	—	—	—	—	AT 40	—	—	—	
K 01	—	—	A 1	—	H 3	DK 03	H 2	—	TH 03	D 3	$\overline{\text{TH 3}}$	H 3	
K 05	H 4	H 2	—	—	H 2		W	H 2	TH 05	D 2	$\overline{\text{TH 2}}$	H 2	
K 10	H HH	H 1	A 2	F 2	H 1	DK 10	H 1	H 1	TH 10	D	$\overline{\text{TH 1}}$	H 1	
	NS					DK 12							
K 20	N	G 1	A 4	F 1	G 1	DK 20	G 1	G 1	TH 20	DK	$\overline{\text{TG 1}}$	G 1 GO et FG	
K 30	NC	G 2	A 5	R	G 2	—	GW	—	TH 30	—	$\overline{\text{TG 2}}$	G 152	
K 40	G	G 3	A 6	R 2	—	DK 40	G 2	G 2	TH 40	DK 2	$\overline{\text{TG 3}}$	G 2	
										DK 3			
K 50	RD	G 4	—	R 4	—	—	—	G 3	—	DK 4	$\overline{\text{TG 6}}$	G 3	

Une nuance inscrite à cheval sur le trait de séparation de deux groupes couvre en principe le domaine de ces deux groupes.
(1) Communiqué par la Chambre syndicale des fabricants de carbures métalliques durs.

Nota. — Les couleurs normalisées employées pour désigner les différents groupes sont les suivantes :
Groupe P : bleu ; groupe M : jaune ; groupe K : rouge.

Tableau B — Plaquettes en carbures métalliques (Groupes d'application)

Signification des flèches (1) Sens croissant de la dureté (2) Sens croissant de la ténacité	Groupes d'enlèvement de copeaux	Groupes d'application		
	Couleurs et lettres	Désignation	Matières à usiner	Conditions de travail
1 ↑ 2 ↓	Couleur : bleu	**P 01**	Acier, acier moulé.	Tournage, alésage de finition. Vitesse de coupe : élevée. Section de copeaux : faible. Travail sans vibrations.
		P 10		Tournage, copiage, filetage, fraisage. Vitesse de coupe : élevée. Section de copeaux : faible à moyenne.
		P 20	Acier, acier moulé. Fonte malléable à copeaux longs.	Tournage, copiage, fraisage. Rabotage à faible section de copeaux. Vitesse de coupe : moyenne. Section de copeaux : moyenne.
		P 30		Tournage, fraisage, rabotage. Vitesse de coupe : moyenne à faible. Section de copeaux : moyenne à grande. Conditions de travail moins favorables (1).
	Métaux ferreux à copeaux longs	**P 40**	Acier, acier moulé (avec inclusions de sable et retassures).	Tournage, rabotage, mortaisage. Vitesse de coupe : faible. Section de copeaux : grande. Grand angle de coupe possible. Conditions de travail défavorables (1). Peut s'employer sur machines automatiques.
		P 50	Acier, acier moulé de moyenne ou faible résistance (avec inclusions de sable et retassures).	Tournage, rabotage, mortaisage. Vitesse de coupe : faible. Section de copeaux : grande. Grand angle de coupe possible. Conditions de travail défavorables (1) nécessitant une ténacité élevée du carbure métallique. Convient sur machines automatiques.

Tableau B (suite)

Couleur et matières	Groupe	Matières à usiner	Opérations et conditions
Couleur : jaune	M 10	Acier, acier moulé, acier au manganèse, fonte grise, fonte alliée.	Tournage. Vitesse de coupe : moyenne à élevée. Section de copeaux : faible à moyenne.
	M 20	Acier, acier moulé, acier inoxydable, acier au manganèse, fonte grise.	Tournage, fraisage. Vitesse de coupe : moyenne. Section de copeaux : moyenne.
Métaux ferreux à copeaux longs et à copeaux courts	M 30	Acier, acier moulé, fonte grise, alliages réfractaires.	Tournage, fraisage, rabotage. Vitesse de coupe : moyenne. Section de copeaux : moyenne et grande.
	M 40	Acier de décolletage, acier de faible résistance, métaux non ferreux et alliages légers.	Tournage, copiage, tronçonnage. Convient sur machines automatiques.
Couleur : rouge	K 01	Fonte grise de grande dureté moulage en coquille, alliages d'aluminium à haute teneur en silicium, acier trempé, matières plastiques abrasives, céramiques.	Tournage, alésage de finition, fraisage, grattage.
	K 10	Fonte grise (HB > 220), fonte malléable à copeaux courts, acier trempé, alliages d'aluminium au silicium, alliages de cuivre, matières plastiques, verre, caoutchouc durci, carton, porcelaine, roches, pierres.	Tournage, perçage, fraisage, alésage, grattage, brochage.
Métaux ferreux à copeaux courts Métaux non ferreux et matériaux non métalliques	K 20	Fonte grise (HB < 220), cuivre, laiton, aluminium, bois comprimés fortement abrasifs.	Tournage, fraisage, rabotage, alésage et brochage nécessitant une ténacité élevée du carbure métallique.
	K 30	Fonte grise de faible dureté, acier à faible résistance, bois comprimé.	Tournage, fraisage, rabotage, mortaisage. Grand angle de coupe possible. Conditions de travail défavorables (1).
	K 40	Bois tendre et bois dur à l'état naturel, métaux non ferreux.	

La présente classification extraite d'un document ISO concerne les carbures métalliques pour outils destinés à l'usinage par enlèvement de copeaux.

Elle comporte trois groupes principaux, caractérisés par l'aptitude de chacun d'eux à l'enlèvement de copeaux plus ou moins longs sur les matières à usiner.

Chacun de ces groupes, identifié par une lettre encadrée, est subdivisé en groupes d'application ayant un numéro distinctif, 10, 20, 30, . . ., (05, 15, 25, . . ., pour les groupes intermédiaires) se rapportant aux différentes conditions de travail et aux matières à usiner.

(1) Écroutages, coupes intermittentes, vibrations, faux-ronds, etc. — ISO (Organisation internationale de normalisation).

4.1.2. Les outils « de forme » et les outils « à profil constant ». — À côté de ces outils, que l'on peut qualifier de simples en ce qui concerne leur fonctionnement, on trouve des outils plus élaborés permettant de résoudre certains problèmes de portée plus restreinte. On peut citer, en particulier, les outils dits « de forme » et les outils dits « à profil constant ».

Un outil de forme est constitué par une arête coupante qui a la forme exacte de la pièce à usiner ; lorsque celle-ci a été dégrossie, il suffit de monter l'outil de forme sur la machine pour obtenir le profil désiré. Dans ces outils, la dépouille est constante et l'affûtage de l'arête permet de maintenir l'usinage dans les tolérances fixées. On utilise, en général, les outils de forme pour usiner des profils plans ou circulaires, mais rien ne s'oppose à créer des outils plus complexes, sous réserve que le prix de leur confection et de leurs réaffûtages soit amorti par une série suffisante. La variante dite à profil constant (fig. II-14) est relativement simple ; elle se compose, en général, d'une molette circulaire dont la circonférence extérieure est taillée au profil désiré. L'avantage de ce dispositif est qu'on peut effectuer autant d'affûtages qu'on le désire sans changer la forme ni les dimensions de la molette.

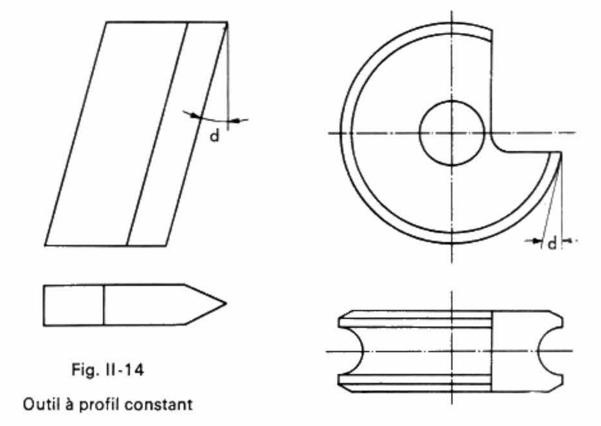


Fig. II-14

Outil à profil constant

4.2. Les outils à arêtes multiples, fraises et broches. — Ces outils sont composés d'une tige portant les outils de coupe proprement dits, répartis, en général, le long de la tige et parfois à l'une de ses extrémités. Certains de ces outils sont tournants et montés à cet effet sur une broche au moyen d'une queue d'emmanchement ; c'est le cas des fraises et des outils de taillage d'engrenages. D'autres exercent leur effort de coupe par translation, soit en poussant, soit en tirant ; c'est le cas des broches. On signalera ici, simplement pour mémoire, le cas des meules qui peuvent être considérées comme des outils à arêtes multiples, celles-ci étant constituées par les grains d'abrasifs ; cependant leur mode d'emploi est assez particulier pour qu'il soit évoqué dans un chapitre spécial.

Lorsque l'outil est tournant, les arêtes de coupe travaillent seulement pendant leur passage devant la pièce, c'est-à-dire d'une manière intermittente ; au contraire, lorsque l'outil se déplace par translation, toutes les arêtes sont amenées à travailler en même temps. On conçoit ainsi la différence fondamentale entre les deux méthodes de travail.

Il est intéressant d'examiner le fonctionnement des fraises auxquelles les outils de taillage peuvent être assimilés. Les fraises ont des dents réparties sur la surface du corps d'outil conformément à certaines règles. La fraise la plus simple a des dents dites droites, c'est-à-dire réparties suivant une section droite du corps d'outil ; elle usine donc de telle manière que, seules, les dents placées

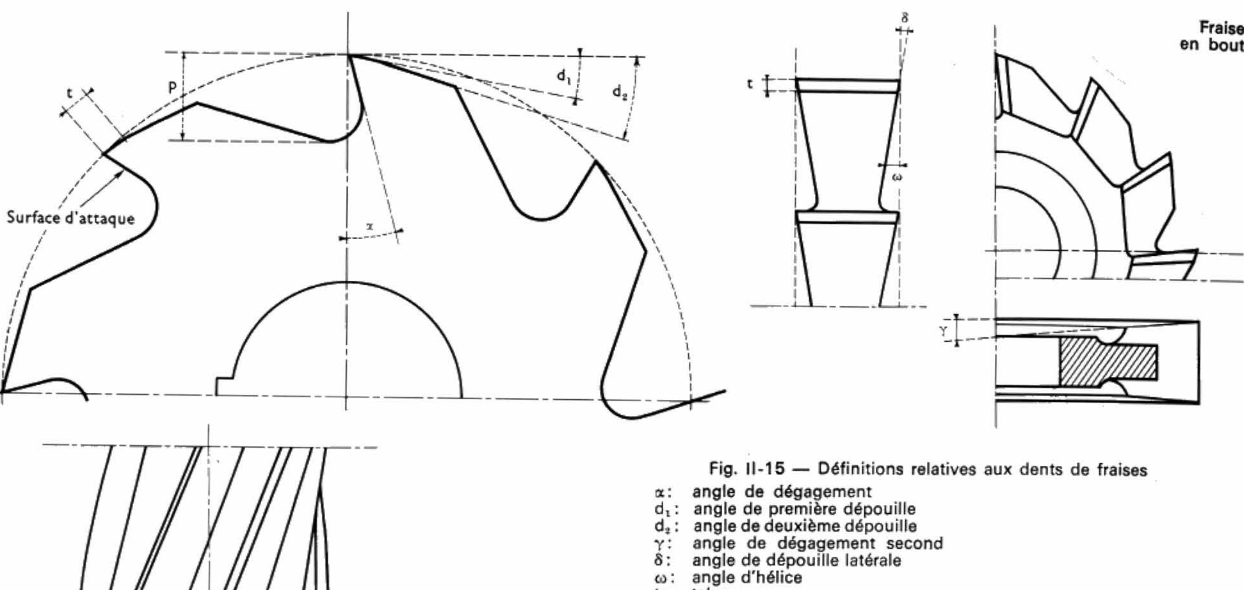


Fig. II-15 — Définitions relatives aux dents de fraises

α : angle de dégagement
d_1 : angle de première dépouille
d_2 : angle de deuxième dépouille
γ : angle de dégagement second
δ : angle de dépouille latérale
ω : angle d'hélice
t : talus
p : profondeur des dents

le long d'une génératrice effectuent un usinage simultané. Il se produit, par conséquent, un usinage intermittent, puisque chaque groupe de dents placées sur une même génératrice effectue une coupe et que le groupe suivant ne se trouve en position de coupe qu'après une rotation suffisante de la fraise. Pour éviter cet inconvénient, on a eu recours depuis très longtemps aux dents hélicoïdales dont l'avantage essentiel consiste dans le fait qu'il y a toujours une ou plusieurs dents en prise avec la pièce : de ce fait, la régularité de la coupe est beaucoup plus grande, ce qui compense le prix nécessairement plus élevé de la fraise. L'hélice matérialisée par une arête est soit à droite, soit à gauche suivant les cas.

Ces types de fraises sont désignés par l'expression « à denture périphérique » et l'on dit qu'elles travaillent « en roulant ». Il existe également des fraises dites « en bout », dont les dents sont réparties sur l'une des faces terminales du corps d'outil, ou parfois même sur les deux faces terminales. Le travail de ces fraises s'effectue par rotation et l'avance a lieu dans la direction de l'axe de rotation ; l'une de leurs applications est l'usinage de surfaces planes. Ces deux types de fraises peuvent coexister, en ce sens que le corps de l'outil peut porter des dentures périphériques hélicoïdales — ou planes — et des dentures en bout ; dans ce cas il est possible d'usiner des surfaces perpendiculaires entre elles.

Chaque dent de fraise représente un outil qui possède, comme les outils de tour, des caractéristiques. La figure II-15 donne les désignations des angles et des dimensions des dents pour les fraises à denture périphérique. Pour les fraises en bout, les dents ont un chanfrein à leur extrémité pour pouvoir attaquer la pièce à fraiser ; le chanfrein n'est pas nécessaire pour les fraises périphériques dont les dents attaquent la pièce directement et non latéralement. Pour imprimer aux fraises la rotation nécessaire, il faut les monter sur une broche tournante. À cet effet, ou bien le corps d'outil porte à l'une de ses extrémités une queue qui peut pénétrer dans le cône intérieur de la broche, ou bien le corps d'outil porte en son centre un alésage dans lequel on peut faire pénétrer un arbre qui se fixe à la broche, ou bien encore l'une des faces du corps d'outil est munie de dispositifs (vis ou autres) permettant de les fixer à l'extrémité de la broche. Les avantages respectifs de ces modes de fixation dépendent des travaux à exécuter, de la forme des fraises et des qualités des fraiseuses utilisées. En dehors de toutes ces considérations particulières, il semble que le montage par emmanchement d'une queue dans le cône intérieur de la broche soit la solution la plus courante (fig. II-16). Toutefois, les fraises montées sur un arbre sont très utilisées dans des travaux de série lorsque l'on doit monter plusieurs fraises sur le même arbre.

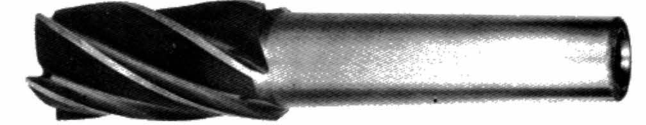


Fig. II-16 — Fraise en bout, à queue

En raison des applications de plus en plus variées du fraisage, il était naturel que l'on se soit préoccupé de donner aux fraises des formes répondant le mieux à ces applications ; cela explique la variété des modèles que l'on trouve couramment dans les ateliers. Sans que l'énumération donnée ci-après puisse être considérée comme complète, on indiquera, en particulier :

Les fraises à coupe latérale. — Ce sont les fraises dont on dit qu'elles travaillent « en roulant » ; comme on l'a indiqué ci-dessus, elles ont des dents sur la périphérie et sur une ou sur deux faces terminales. Par un montage convenable, on peut usiner des rainures ; si les fraises sont montées sur le même arbre, avec entre elles un espace suffisant, on peut usiner plusieurs rainures à la fois.

Les fraises à dents alternées. — Ces fraises sont courtes et portent des dentures hélicoïdales alternativement à droite et à gauche. Pour éviter de rayer la partie usinée, on dégage nettement la partie coupante de la dent par rapport à son flanc. Ces fraises sont très utiles pour usiner des rainures très étroites ; leur épaisseur varie de 1 à 5 mm et il faut utiliser des montages spéciaux pour éviter la flexion du corps d'outil. Le fraisage des métaux non ferreux nécessite un affûtage spécial.

Les fraises coniques (fig. II-17) sont utilisées toutes les fois que les pièces à usiner présentent des angles, ce qui est le cas, par exemple, des queues d'aronde ; elles peuvent avoir la forme d'un tronc de cône ou de deux

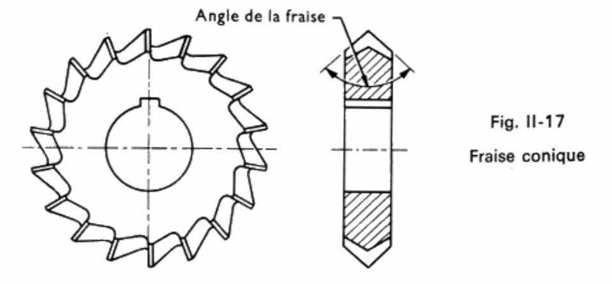


Fig. II-17

Fraise conique

troncs de cône accolés par leur base. Les angles des cônes peuvent être égaux ou différents; en général ils sont compris entre 45° et 90°.

Les fraises pour rainures en T sont destinées à usiner la partie horizontale du T après que la partie verticale ait été usinée.

Les fraises dites Woodruff sont analogues aux fraises à dents périphériques et en bout, mais leurs dimensions sont plus petites; jusqu'à des diamètres de 50 mm, elles sont munies de queues d'emmanchement; pour des diamètres plus grands, elles sont plutôt montées sur des arbres.

Les fraises « mouche » sont composées d'une seule dent ayant une forme particulière et destinées à un travail déterminé; elles sont utilisées surtout dans les ateliers de prototypes.

Les fraises de forme peuvent avoir tous les profils nécessaires à l'exécution de pièces pour lesquelles il serait indispensable d'utiliser plusieurs fraises en plusieurs opérations. Leur fabrication est, en général, assez facile à réaliser mais il peut arriver, dans le cas de certaines formes, que les réaffûtages soient d'une exécution délicate.

On admet que, lorsque l'angle d'hélice est inférieur ou égal à 25°, il faut utiliser un grand nombre de dents; la coupe est faible et les copeaux s'évacuent facilement. Les fraises dont l'angle d'hélice atteint 45° permettent l'enlèvement d'une grande quantité de matière; comme le nombre de dents n'est, en général, pas trop grand, l'évacuation des copeaux se fait également sans difficulté. Lorsque l'angle de l'hélice dépasse 45°, l'enlèvement de matière diminue; dans ce dernier cas, il n'est pas indiqué de les monter sur un arbre. Les dents peuvent faire partie du corps de la fraise; elles peuvent aussi être rapportées sur celui-ci au moyen de fixations mécaniques ou par brasage (fig. II-18). L'intérêt qui s'attache à rapporter les dents réside, plus encore que pour les outils de tour, dans la possibilité de réduire l'emploi de matières d'un prix élevé (on utilise une matière bon marché pour le corps même de l'outil). L'intérêt est d'autant plus notable que les fraises elles-mêmes ont des dimensions plus grandes.





Fig. II-18

Fraise en bout à dents rapportées (*Safety*)

En principe, on cherche à utiliser les mêmes fraises pour l'ébauche et la finition. Dans le cas des fraises en bout, si l'on ne désire pas utiliser les mêmes dents pour les deux opérations, on dispose les dents de finition à l'intérieur de la circonférence portant les dents d'ébauche.

Pour *les fraises hélicoïdales*, les dents sont souvent en forme d'hélices fixées au corps de fraise par des coins et des vis; si les surfaces à fraiser sont grandes, l'emploi de fraises à dents alternées est préférable.

De nombreuses variantes pourraient être décrites; on mentionnera simplement les fraises pour le taillage d'engrenages et les fraises pour les matériaux légers et ultra-légers. Les premières sont peu différentes des fraises destinées au fraisage courant; pour les secondes, des précautions particulières doivent être prises en raison de la rapidité particulière de la coupe de ces matières.

Jusqu'à un certain point, les forets peuvent être assimilés à des fraises hélicoïdales (fig. II-19); leur fabrication pose certains problèmes spéciaux en ce qui concerne, notamment, l'extrémité du foret et son diamètre. L'extrémité est souvent formée d'un élément rapporté particulièrement dur pour pénétrer plus facilement la matière à percer; par ailleurs, les arêtes doivent avoir un angle d'hélice correspondant bien au perçage envisagé et l'évacuation des copeaux, particulièrement délicate dans certains cas, doit être adaptée à la matière travaillée. Dans un autre ordre d'idées, le perçage comporte par lui-même une grande part de porte-à-faux qui peut, au même titre qu'une évacuation insuffisante de copeaux, entraîner la rupture du foret; le diamètre de celui-ci doit donc faire l'objet de toute l'attention des utilisateurs.

4.3. La matière constitutive des outils. — Il y a eu, depuis le début du siècle, une évolution constante dans le choix de la matière première destinée à la fabrication des outils; d'ailleurs, cette évolution était rendue nécessaire par l'évolution constante de la matière utilisée dans les pièces à usiner.

On peut classer ces matières en quatre groupes: acier au carbone ou allié, acier à coupe rapide, carbures, autres matières.

4.3.1. Les aciers au carbone. — En général, ils contiennent d'autres constituants, tels que le manganèse, le soufre ou le phosphore qui sont des impuretés ou qui proviennent de la désoxydation des bains; mais c'est la teneur en carbone qui reste la principale caractéristique à prendre en considération. Le taux en carbone de 1 % correspond à une dureté Rockwell de 65 qui est considérée comme étant la valeur moyenne. Au-dessus de ce taux, la résistance des outils est grande et elle permet le travail d'ébauche; au-dessous, les outils sont plutôt destinés à la finition.

D'une manière générale, les aciers au carbone s'échauffent pendant le travail de la coupe et les outils perdent une partie de leur aptitude à usiner. C'est pourquoi, aussitôt que l'on désire obtenir des rendements importants, il est préférable d'utiliser d'autres matières.

On range, en principe, dans la catégorie des aciers au carbone, les aciers dits alliés, c'est-à-dire contenant en très petites quantités des métaux dits « nobles », comme le chrome, le tungstène, le vanadium. Le vanadium régularise le grain du métal; la présence du chrome, avec ou sans vanadium, élimine les points tendres et accroît la résistance à l'usure. Dans ces deux cas, les performances des outils sont améliorées par rapport à l'acier au carbone. L'addition de tungstène avec le vanadium et le chrome-vanadium améliore plus nettement encore ces performances.

Les outils reçoivent presque toujours un traitement de trempe et de revenu. La trempe est réalisée par les procédés habituels: chauffage à une température déterminée puis immersion rapide dans un bain qui est, suivant les cas,

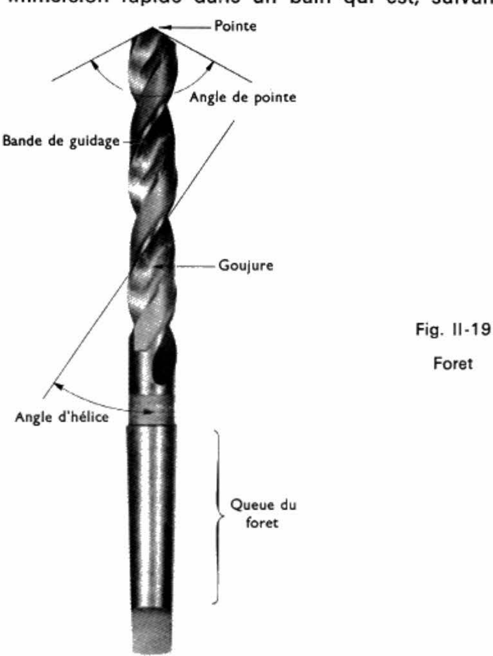


Fig. II-19

Foret

constitué par de l'eau, de l'huile, des sels et parfois du plomb et même du cyanure. Un revenu convenable corrige les inconvénients de la trempe, notamment les tensions internes susceptibles de créer des tapures. Il est difficile de donner des précisions chiffrées en ce qui concerne l'exécution de ces opérations de traitement thermique; en général ces indications sont fournies par les vendeurs d'outils.

4.3.2. Les aciers à coupe rapide. — Ils ont pour caractéristiques essentielles de conserver toutes leurs propriétés, même s'ils sont portés au rouge. Ils présentent une certaine fragilité après trempe et il faut en tenir compte dans l'utilisation des outils, mais, dans l'ensemble, leur résistance aux chocs et à l'usure est considérable. On distingue les catégories suivantes:

Aciers au tungstène. — Ces aciers ont pénétré dans l'industrie vers 1904 et présentent les variantes suivantes:

— Acier 18-4-1 (tungstène 18-chrome 4-vanadium 1). Cette formule reste encore l'une des meilleures.

— Acier 18-4-2 (tungstène 18-chrome 4-vanadium 2). Cet acier offre une durabilité considérable augmentée par une très légère addition de molybdène (0,4 à 0,9).

— Acier 14-4-2 (tungstène 14-chrome 4-vanadium 2). Cet acier a les mêmes caractéristiques que les précédents mais il est plus hétérogène à la trempe; ce défaut peut être corrigé en augmentant la teneur en tungstène.

Aciers au molybdène. — Ces aciers sont supérieurs aux précédents mais ils s'oxydent dès que la température s'élève. Aussi, préfère-t-on des aciers avec tungstène et molybdène, ou mieux avec tungstène, molybdène, chrome et vanadium (tungstène 6, chrome 4, vanadium 2, molybdène 5) qui répondent à tous les desiderata et ne se décarburent pas.

Aciers au cobalt. — L'addition du cobalt augmente encore les qualités des aciers précédents et permet notamment, d'augmenter les vitesses de coupe et d'usiner des pièces non homogènes. Toutefois, ces aciers ont tendance à se décarburer et à devenir friables à la trempe. Il est recommandé de ne pas dépasser une proportion de cobalt de 12 %, ce qui permet de conserver des arêtes très coupantes et un grain régulier. Les additions aux aciers contenant du molybdène ne doivent pas dépasser 9 % de cobalt.

En ce qui concerne la trempe, des précautions doivent être prises et il est parfois nécessaire de tremper à des températures très basses, atteignant parfois — 60 °C. Par ailleurs, la nitruration et le chromage sont de nature à améliorer la surface utile par durcissement, ce qui facilite l'usinage de la fonte et des métaux ferreux.

On rattachera à cette catégorie les outils dits « fondus », obtenus par moulage d'aciers à coupe rapide. Par ce procédé, on peut obtenir des outils excellents, supérieurs aux outils forgés, mais cependant inférieurs aux métaux frittés dont il est question ci-après.

4.3.3. Les outils en carbure. — Ces outils comportent une plaquette obtenue à partir de poudres de tungstène, de tantale et de titane. Elles sont agglomérées par des liants contenant du nickel et du cobalt. Les mélanges sont portés à des températures très élevées pouvant atteindre 1 500 °C, puis, à des températures voisines de 700 °C ils sont comprimés pour obtenir des plaquettes ayant la forme désirée. À l'origine, les plaquettes ainsi fabriquées étaient très fragiles et ne permettaient que l'usinage de pièces très homogènes; depuis 1930 environ, date de leur apparition sur le marché, les très grands progrès réalisés dans la composition des poudres et de leur liant ont notablement réduit cette fragilité. La dureté définitive est obtenue après trempe à l'air et peut atteindre 90 Rockwell A (on rappellera que la dureté Rockwell A est obtenue en prenant comme charge 60 kg au lieu de 150 kg). En raison de leur composition chimique, on ne doit évidemment pas les refroidir par arrosage avec des liquides contenant du soufre qui attaquent le nickel et le cobalt contenus dans le liant.

La composition des carbures peut varier à l'infini; on retiendra simplement les compositions suivantes à titre d'exemples:

— Carbure de tungstène: carbure de tungstène 87 %, nickel 13 %; dureté Rockwell A: 87.

— Carbure de tantale: carbure de tantale 75 %, tungstène 13 %, dureté Rockwell A: 88; on l'utilise avantageusement pour l'usinage d'acier ayant des duretés Brinell de 200 à 250 daN/mm².

— Carbure de tungstène et de titane. L'élément tungstène prédomine, le liant entrant pour 13 %, la dureté Rockwell A est proche de 90.

L'emploi des carbures a constitué une révolution au moins aussi grande que celui des aciers à coupe rapide au moment où ceux-ci avaient été lancés sur le marché, mais les rendements obtenus sont deux à trois fois supérieurs. De plus, l'utilisation de plaquettes réduit le prix de l'outil et, lorsque les montages le permettent, comme on l'a indiqué plus haut, il est possible de changer de plaquette sans changer la totalité de l'outil.

L'affûtage du carbure est parfois délicat en raison de sa dureté; toutefois les meules en carbure de silicium permettent un ébauchage rapide et les meules diamant une finition poussée, surtout si l'on utilise des meules à grain très fin (400 à 500). Par ailleurs, l'affûtage par électroérosion et l'affûtage électrolytique, encore peu répandus, paraissent offrir des possibilités tout à fait nouvelles que la pratique permettra certainement de confirmer.

4.3.4. Les autres outils. — Dans la catégorie des autres outils, on rangera les outils *diamant* et les outils dits *céramique*; il sera question plus loin d'autres procédés plus récents tels que l'électroérosion, et ceux qui utilisent les plasmas, les faisceaux d'électrons, les lasers, etc.

Les outils diamant sont évidemment d'un prix élevé et leur emploi est limité à certaines opérations telles que les alésages fins. Ils sont en général utilisés pour des opérations sur des alliages légers ou, en tout cas, peu résistants et au moyen de passes faibles pour éviter des ruptures d'outils. La qualité du fini obtenu est excellente et peut se comparer à une rectification. Les diamants utilisés sont du type industriel.

Les outils céramique sont de mise au point récente; après avoir été l'objet d'un engouement un peu excessif, ils tendent à trouver leur emploi dans les applications qui correspondent le mieux à leurs propriétés. Le terme céramique est, d'ailleurs, en partie impropre car les compositions d'origine comprenaient essentiellement de l'aluminium très pur, en grains très petits, agglomérés par frittage à très haute température (1 800 °C environ). Ces compositions ont ensuite été modifiées par apport de matériaux variés et, notamment, des métaux; les outils prennent alors le nom de *cermet*. L'intérêt de ces outils réside dans le fait qu'ils utilisent de matières dont le prix est nettement moins élevé que celui des métaux nobles comme le tungstène, le cobalt ou le vanadium. Par ailleurs, ils se sont révélés très aptes à la réalisation de grandes vitesses de coupe (400 mètres par minute par exemple). Leur emploi le plus intéressant paraît résider dans l'usinage de la fonte et de certains aciers spéciaux. Leur rendement est toutefois limité par leur fragilité qui ne permet pas, en particulier, de dépasser les vitesses de coupe indiquées ci-dessus.

5. LA DYNAMIQUE DE LA COUPE

La coupe des métaux a été étudiée d'une manière continue et ne cesse de faire l'objet de travaux très poussés. À l'origine, ces travaux ont été effectués sous la direction de personnalités très connues telles que Taylor, Le Châtelier, le commandant Denis, Herbert, etc., qui manquaient parfois des moyens nécessaires à une étude scientifique poussée; ultérieurement, il s'est créé des laboratoires et des stations d'essais, ou centres d'études et de recherches qui ont pu donner à leurs travaux un caractère de technique plus poussée. On peut citer, en particulier, le laboratoire central de l'Armement, le laboratoire de l'Université d'Aix-la-Chapelle et de nombreux autres centres d'études, parmi lesquels ceux qui existent en U.R.S.S. et au Japon jouent un rôle particulièrement important. Toutefois, ces études ne peuvent remplacer les observations qui sont effectuées dans les usines et dans les ateliers où, tous les jours, il faut résoudre des problèmes nouveaux. C'est une coopération constante entre les ateliers et ces services d'études qui a permis de prévoir et surtout d'expliquer

certains paradoxes mis en lumière par la pratique. La coupe négative et le fraisage dit « en avalant » en sont les exemples les plus connus.

Le sujet est si vaste qu'il est seulement possible d'exposer ici les idées les plus générales concernant les efforts de coupe et les conditions les meilleures d'usinage en pratique.

5.1. Les efforts de coupe. — Les efforts de coupe peuvent être classés ainsi: détachement du copeau, arrachement de matière en même temps que le copeau est coupé, déperdition d'énergie par élévation de température, création de vibrations, etc. On examinera simplement le premier élément, c'est-à-dire le détachement du copeau, dans le cas le plus simple qui est l'outil de tour à une seule arête tranchante.

L'effort R peut être décomposé en trois composantes parallèles à trois axes de coordonnées rectangulaires Fx, Fy, Fz (fig. II-20). Fx est la force correspondant à l'avance de l'outil; elle est relativement faible. Fy est la force correspondant à la pression de l'outil sur la pièce sans qu'il y ait coupe au vrai sens du mot; elle est également faible si l'outil est bien affûté et a une arête coupante bien adaptée au travail à exécuter. Fz, composante dans le

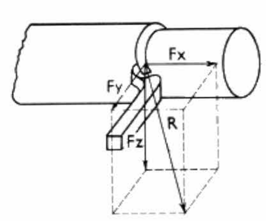


Fig. II-20

Composantes de l'effort de coupe

sens de l'effort tangentiel est la force la plus grande. Le travail effectué est ainsi égal à $Fz.d$, où d représente le déplacement de l'outil. Ce travail est mesuré par plusieurs procédés: moyens piézoélectriques, méthodes électromagnétiques, ou à l'aide de dynamomètres à jauges extensométriques. Toutefois, ces mesures sont, délicates car il faut arriver à bien préciser la part d'énergie utilisée pour la coupe et celle qui est absorbée par l'élévation de température et par les vibrations. La mesure des températures est relativement simple, mais celle de l'énergie dissipée en vibrations l'est beaucoup moins. Tout l'art des chercheurs consiste à isoler exactement les formes d'énergie dissipées; en revanche, des appareils assez simples, comme des wattmètres, suffisent pour enregistrer l'énergie totale dépensée pendant une opération de coupe.

L'effet de coupe lui-même peut être évalué par des formules empiriques; par exemple, on utilise la formule: $F = paK$, p étant la profondeur de passe, a l'avance et K la pression spécifique de coupe. Une autre formule, plus complexe, est la suivante: $F = K(1 - K'b)q^m p^n$ où K, K', m, n, sont des coefficients dépendant de la matière usinée, des conditions de coupe, et b, q, p, respectivement l'avance, l'angle d'affûtage et la profondeur de passe.

Certains ateliers établissent leurs propres formules et d'autres agissent d'après leur expérience, ce qui laisse encore une large marge d'étude aux chercheurs dans ce domaine.

On retrouve des formules empiriques en ce qui concerne l'étude de la formation du copeau. La coupe par l'outil peut être considérée comme un enfoncement de celui-ci dans la matière, à la manière d'un coin; une fois enfoncé, l'outil détache le copeau pendant l'avance mais l'effet de coupe est presque toujours, sinon toujours, accompagné d'un effet d'arrachement. De plus, en étant arraché, le métal subit une compression qui l'écrouit; cette déformation, cette compression et le frottement du copeau sur l'outil provoquent une élévation de température qui peut atteindre 800 °C. L'outil est donc soumis à cet échauffement et également à une usure provenant de son frottement sur la pièce et sur le copeau.

Pour l'instant, l'étude qui paraît la plus complète sur ce sujet semble être celle d'Ernst et Merchant. Cette étude comporte quelques hypothèses simplificatrices: coupe orthogonale, c'est-à-dire obliquité de l'outil égale à 90°, étude limitée à ce qui se passe dans un plan (par exemple, les déformations latérales sont négligées). Les notations utilisées sont les suivantes:

a = avance de l'outil;
b = angle de dégagement;
d = angle de dépouille;
e = épaisseur du copeau;
F = force de frottement;
F_c = effort de coupe;
F_s = force de cisaillement;
F_n = force de compression;
F_t = force transversale.
N = force normale à l'outil;
p = profondeur de passe;
R = action du copeau sur l'outil;
R' = réaction de l'outil sur le copeau;
V_c = vitesse de coupe;
φ = angle du plan de déformation;

Ernst et Merchant ont établi les formules suivantes (fig. II-21):

Rapport de coupe: $r = \frac{a}{e}$

Coefficient de frottement:

$$\lambda = \frac{F}{N} = \operatorname{tg} \tau$$

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{F_c \operatorname{tg} b + F_t}{F_c - F_t \operatorname{tg} b}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{r \cos b}{1 - r \sin b}$$

$$F_s = F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi$$

$$F = F_c \sin b + F_t \cos b$$

$2\varphi + \tau - b = \text{Cte} = c$. On l'appelle souvent constante de Bridgman.

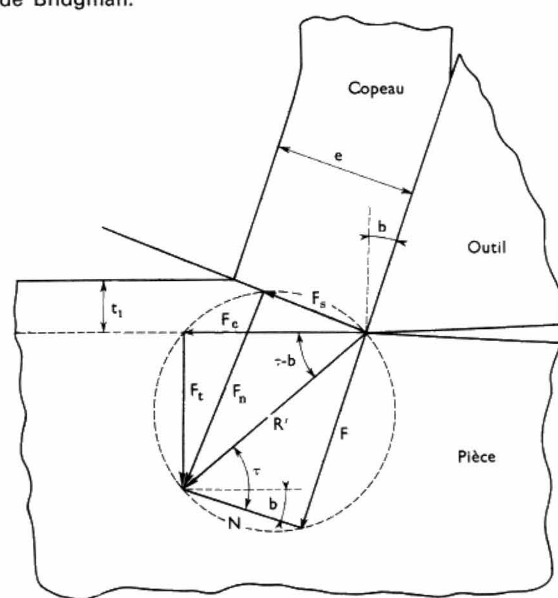


Fig. II-21 — Diagramme des forces de Ernst et Merchant

L'étude de ces formules ainsi que l'expérience des utilisateurs permettent de tirer les conclusions suivantes: l'effort de coupe est proportionnel à la section du copeau; il varie dans le même sens que le coefficient de frottement, en sens inverse de l'angle de dégagement et de la constante de Bridgman. Le rapport de coupe croît avec la résistance au cisaillement de la matière usinée. Il est difficile de relier l'usinabilité aux caractéristiques habituelles de la matière travaillée, c'est-à-dire à la résistance à la traction et à la dureté.

Le copeau peut être discontinu, auquel cas la matière détachée de la pièce dans la coupe se fragmente presque aussitôt qu'elle est détachée. Il peut être continu, auquel cas la matière détachée de la pièce ne se fragmente pas: le copeau se déforme sous l'action de la coupe. Mais il peut

Matière usinée	Angle d'attaque	ε_v	C_v acier rapide à 18 % de W	C_v outil en carbure	C_v outil en acier fondu au carbone
Laiton	64°	1,65	112	224	56
Cuivre rouge	64°	2,23	80	160	40
Acier Martin			50	100	25
Acier - 30 à 50 hbar Acier - 50 à 60 hbar Acier - 60 à 80 hbar	65°	2,44	35	70	17,5
Acier moulé	67°	2,75	28,7	57,4	14,4
Acier au chrome-nickel	68°	1,75	29	58	14,5
Fonte douce	65°	3,60	42	84	21
Fonte moyennne	65°	3,60	26	52	13
Fonte dure	65°	3,60	15	30	7,5

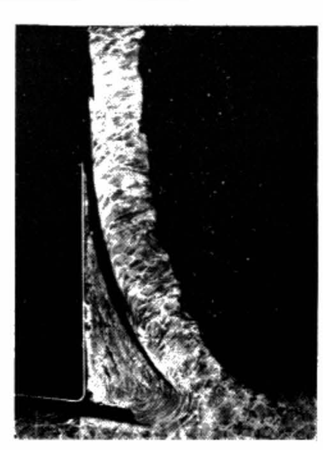


Fig. II-22

Formation du copeau ; on voit l'arête rapportée à l'extrémité de l'outil (*Oswald Forst*)

arriver aussi que le copeau continu adhère à l'outil sous l'influence d'éléments perturbateurs : température, frottement. Il en résulte la formation d'une véritable arête rapportée sur l'arête de l'outil et susceptible de créer des perturbations dans l'usinage (fig. II-22). L'importance de cette arête rapportée augmente jusqu'à ce qu'elle soit évacuée vers le copeau ou vers la pièce ; dans ce dernier cas, il peut en résulter une altération de l'état de surface de la pièce. On arrive à éliminer l'arête rapportée en augmentant la vitesse de coupe et en diminuant l'avance c'est-à-dire en réduisant le rendement de l'usinage ; parfois l'emploi de lubrifiants appropriés permet d'éviter cette réduction.

L'épaisseur minimale d'un copeau est obtenue lorsque l'outil cesse de couper réellement et glisse sur la pièce ; on peut considérer qu'un outil de finition permet d'obtenir un copeau dont l'épaisseur ne dépasse pas 0,05 mm ; parfois elle est encore plus faible.

5.2. Les conditions d'usinage des outils. — Ces conditions ont pour objet d'établir la correspondance la meilleure entre la vitesse de coupe à adopter et l'usure de l'outil à tolérer ; en effet, il ne serait pas intéressant de fixer une vitesse de coupe très grande s'il devait en résulter des changements d'outils trop fréquents. On prend aussi parfois en considération le volume de copeaux et l'on met en jeu un certain nombre de considérations dues à la forme de l'outil, à la matière usinée, etc. Il en résulte une quantité assez grande de formules qu'il est assez difficile de relier entre elles.

La formule de Taylor VT^n = constante donne une relation entre la vitesse de coupe V, la durée de l'outil T et un exposant n inférieur à 1 (égal à $\frac{1}{8}$ pour les outils en acier au carbone et à $\frac{1}{5}$ pour les outils au carbure).

La formule du commandant Denis : $a^2 V^3$ = constante signifie que le volume de copeaux débité est constant quand cette formule est applicable (a et V ayant les significations indiquées ci-dessus) ; cette formule a été considérée pendant longtemps comme la meilleure.

La formule de Kronenberg :

$$V_{60} = \frac{C_v}{\sqrt[\varepsilon_v]{S}}$$

précise que pour une vitesse de coupe type V_{60} correspondant à la mise hors service de l'outil par usure au bout d'une heure de travail, on obtient une relation entre la section S du copeau et deux coefficients, l'un C_v dépendant à la fois de la matière usinée et de l'outil et l'autre ε_v dépendant de la matière usinée. Cette égalité est exprimée au moyen des nombres inscrits dans le tableau ci-dessus.

Le Bureau des Temps Élémentaires a proposé la formule :

$$V_t = C_1 . C_2 . K . a\alpha . p\lambda$$

où C_1 est un coefficient dépendant de l'outil, C_2 un coefficient dépendant du métal usiné, K un coefficient dépendant de la forme de l'outil, a l'avance, p la profondeur de passe.

Il est assez difficile d'interpréter ces formules avec une grande précision ; on peut simplement en tirer la confirmation de ce que l'on est conduit à apprécier empiriquement. Pour augmenter l'avance et la profondeur de passe, il faut diminuer la vitesse ; c'est ce qu'on fait, en général, pour l'ébauche. Pour la finition, au contraire, on prend une avance et une profondeur de passe très faibles et une vitesse de coupe aussi grande que possible. À titre d'information, la profondeur de passe peut atteindre 12 mm, l'avance est comprise entre 0,7 à 1,5 mm ; il serait dangereux de descendre au-dessous de cette valeur, sinon l'outil entrerait en friction avec la pièce sans l'usiner réellement et il serait soumis à une usure très rapide.

5.3. Étude des conditions d'usinage optimales. — Cette étude résulte en partie seulement des considérations exposées ci-dessus. Mais celles-ci doivent être complétées par un grand nombre d'éléments dont il n'est pas toujours facile d'évaluer l'importance. Certains travaux ont cependant été accomplis par divers auteurs et ont donné lieu à des graphiques utilisables dans les ateliers ; d'autres sont restés purement indicatifs et ont donné lieu à l'établissement de formules plus ou moins simples.

Pour le prix de revient d'une pièce : on doit tenir compte du temps consacré à l'usinage, des temps morts pendant lesquels l'outil monté ne travaille pas (mise en place et enlèvement de la pièce, approche et retrait de l'outil), des temps consacrés aux changements de l'outil, du prix de réaffûtage et d'amortissement de l'outil.

De plus, on doit s'assurer que la vitesse de coupe, les avances, les profondeurs de passes sont compatibles avec la puissance de la machine, c'est-à-dire ne conduisent pas à des broutements et à des vibrations.

Il faudrait également tenir compte du prix de la machine, de ceux des montages, de l'équipement électrique, etc. Il faut aussi évaluer ce qu'on appelle la vitesse de coupe économique (fig. II-23), c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux réaffûtages ; en effet, la durée de l'outil diminue

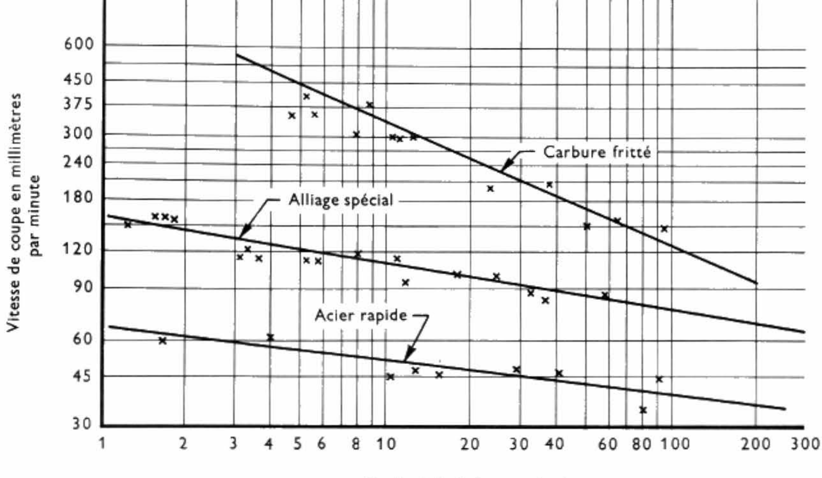


Fig. II-23

Vitesse de coupe économique

quand la vitesse de coupe augmente de sorte qu'il existe une vitesse optimale de coupe. On admet, pour les fraises, la formule suivante :

$$T_c = \frac{60\ G}{M}\left(\frac{1}{C} - 1\right)$$

où G est le prix du réaffûtage et M le coût de la machine par heure (en francs) ; C est une constante qui dépend à la fois de la matière constitutive et de l'outil ; elle est donnée par la formule suivante : $VT_c = K$, où V est la vitesse de coupe en mètres par minute, T_c la vie de la fraise correspondant à la vitesse d'utilisation (en minutes) et K une constante.

On peut établir des graphiques tels que celui de la figure II-23 ; à cet effet, on reporte deux valeurs de T correspondant à deux vitesses de coupe différentes et on joint par une droite les points correspondants. V est la pente de cette droite et K est déduit de la formule ci-dessus.

5.4. Les deux paradoxes de l'usinage. — Dans la coupe négative et le fraisage « en avalant » les conditions de coupe utilisées sont en contradiction avec les théories qui avaient conduit à fixer exactement les valeurs et le sens des différents angles de l'extrémité de l'outil ainsi que de l'angle d'attaque de l'outil sur la pièce.

La face d'attaque de l'outil forme avec le plan tangent à la pièce, au point où se trouve l'arête, un angle aigu C. Il en résulte que c'est l'arête, ou plus exactement la pointe de l'outil, qui reçoit le choc de l'usinage, alors qu'elle représente la partie la plus fragile. Dans l'exécution de travaux très durs on conçoit que cette partie puisse être très rapidement détériorée, mais, a priori, c'est bien cette forme qui paraissait être la plus rationnelle pour l'exécution de la coupe. C'est pourquoi il a paru inutile, pendant longtemps, de chercher d'autres formes d'outils.

5.4.1. La coupe négative. — C'est en recherchant les moyens d'usiner des métaux très durs sans provoquer des bris d'outils qu'on a été amené à la coupe négative. Dans ce procédé, l'angle C devient aigu du fait que la face d'attaque de l'outil fait un angle obtus avec le plan tangent à la pièce. Dans ces conditions, le choc dû à la coupe ne frappe pas la pointe mais la face d'attaque qui est plus solide et moins fragile qu'une pointe. L'angle d'attaque est donc négatif et prend une valeur voisine de 10 à 15° ; l'angle de dépouille reste normal, c'est-à-dire proche de 5 à 6°.

La coupe négative est utilisée surtout pour les travaux de tournage, mais elle peut s'appliquer aussi au fraisage. Les conditions de travail imposées par la coupe négative sont particulièrement dures et ne conviennent qu'à des outils très résistants et possédant une grande capacité de coupe ; en fait, ce sont les outils en carbure ou en céramique qui sont le mieux désignés pour ce genre de travail. Par ailleurs, on ne peut pas utiliser n'importe quelle machine dans de telles conditions et il est indispensable de s'assurer à l'avance de la résistance de celles qu'on emploie, de leur capacité à tourner à grande vitesse ainsi que de la réserve de puissance qu'elles possèdent.

5.4.2. Le fraisage « en avalant ». — C'est un autre paradoxe qui procède de la même idée ; au lieu de faire tourner la fraise d'une manière telle que ses dents attaquent la pièce dans le sens contraire du déplacement de celle-ci (fig. II-24), on fait tourner la fraise en sens inverse de telle manière que tout se passe comme si la fraise et la table de la fraiseuse représentaient le mouvement d'une crémaillère (fig. II-25). Contrairement à ce qu'on aurait pu penser, le fraisage « en avalant » permet d'enlever de plus grandes quantités de copeaux ; jusqu'à un certain point, la théorie de ce mode de travail rappelle celui de la coupe négative en ce sens que, dans le fraisage « en avalant », la fraise ne reçoit pas, au moment où elle approche de la pièce, un choc brutal provenant de ce que les mouvements pièce-fraise sont en sens contraire. Dans ces conditions, la fraise peut pénétrer plus profondément dans la pièce sans risque d'usure exagérée ; comme pour la coupe négative, les machines utilisées doivent être particulièrement résistantes et posséder une grande réserve de puissance. Avant d'adopter ce procédé, il est prudent de s'assurer qu'il convient bien à l'usinage envisagé.

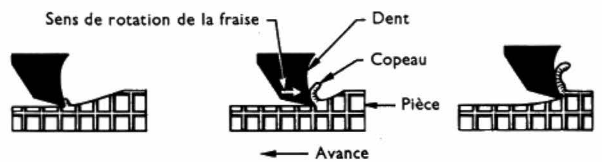


Fig. II-24 — Formation du copeau en fraisage normal

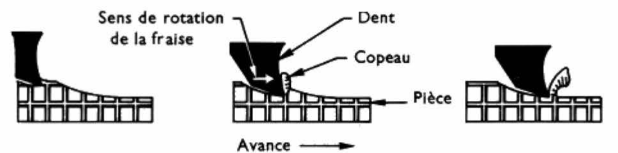


Fig. II-25 — Formation du copeau en fraisage « en avalant »

6. LA LUBRIFICATION

La lubrification est le complément indispensable de l'usinage. Toutefois, le rôle d'un lubrifiant n'est pas limité au refroidissement ; il protège aussi l'arête de l'outil contre l'usure toutes les fois qu'il peut pénétrer entre le copeau et l'outil, même si parfois ce résultat est difficilement atteint comme, par exemple quand l'élévation de température est très grande. Il peut aussi faciliter l'évacuation du copeau, notamment dans l'alésage des trous, en faisant glisser plus facilement le copeau le long des parois du trou.

Le lubrifiant doit répondre à un certain nombre de conditions parmi lesquelles on citera tout d'abord l'aptitude à résister à tout agent susceptible de l'altérer notamment par oxydation. Il ne doit pas non plus être nocif pour les ouvriers qui manipulent les pièces (une maladie bien

connue, occasionnée par des lubrifiants de mauvaise qualité, est l'apparition de boutons sur la peau, dits boutons d'huile).

Si les lubrifiants sont des huiles solubles, celles-ci doivent non seulement être miscibles dans l'eau, mais également rester stables dans les émulsions.

La technique des lubrifiants ne cesse de se perfectionner et constamment des produits nouveaux sont offerts à l'industrie. Malgré tout on peut les classer, d'une manière générale, en lubrifiants à base d'eau, et en lubrifiants à base d'huile.

Lubrifiants à base d'eau. — Ils contiennent une proportion très grande d'eau (jusqu'à 90 %) et des produits spéciaux: antirouille, produits protecteurs de surfaces métalliques, huiles solubles ou produits gras. Ces additions permettent de fixer l'eau sur les surfaces afin de les refroidir, d'éviter en même temps la rouille et de lubrifier au sens réel du terme, c'est-à-dire d'enduire les surfaces de corps gras qui évitent les frottements.

Lubrifiants à base d'huile. — Dans ce cas, la fonction « graissage » est plus marquée que la fonction de refroidissement. On utilise, en général, des huiles minérales pures, provenant de la distillation du pétrole et on y ajoute des produits susceptibles de provoquer une fixation sur les parties métalliques; parmi ces produits, on peut citer le soufre qui empêche une action chimique dangereuse, ainsi que certains produits chlorés. Les produits sulfurés ou chlorés qui se produisent constituent une couche qui s'interpose entre les surfaces métalliques et évite le contact direct métal sur métal. L'action des lubrifiants n'est pas connue d'une manière certaine; elle fait d'ailleurs toujours l'objet de nombreux travaux qui permettront peut-être de mieux la connaître.

Pour l'instant, on peut, cependant, tirer les conclusions suivantes dont la plupart sont d'ailleurs évidentes:

— Plus la vitesse et l'avance augmentent, plus l'action du lubrifiant est difficile à se manifester; en effet, les contacts entre pièce, outil, copeau sont plus rapides, les pressions augmentent et le liquide peut de plus en plus difficilement être maintenu entre les éléments métalliques.

— Ce sont les huiles qui paraissent avoir le plus d'efficacité pour augmenter la durée de l'outil; les huiles minérales pures assurent la protection la meilleure contre l'usure. Les huiles pures mélangées à d'autres constituants (on les appelle parfois huiles dopées), donnent un moins bon résultat; il en est de même pour les émulsions qui, en raison de la transformation de l'eau en vapeur, n'agissent pas dans un sens favorable à la conservation de l'outil; toutefois la présence d'eau a un effet meilleur sur le refroidissement.

Le choix du lubrifiant est donc particulièrement important et nécessite une étude pour chaque opération déterminée. On précisera de plus que de nombreux ateliers sont équipés de systèmes de récupération et d'épuration des lubrifiants dont la consommation représente toujours des frais très importants.

CHAPITRE III

LES MACHINES-OUTILS TRAVAILLANT PAR ENLÈVEMENT DE MÉTAL

1. GÉNÉRALITÉS

Les machines-outils de cette catégorie ont pour objet la fabrication de pièces à l'aide d'outils appropriés en ne faisant intervenir un opérateur que pour le montage et le démontage de la pièce et de l'outil, la mise en marche, les changements de marche et l'arrêt de la machine et la surveillance d'ensemble du fonctionnement général. Il est à peine besoin de rappeler que, dans l'industrie moderne, l'usinage à la main est de plus en plus réduit à quelques cas: travaux artisanaux, retouches, éventuellement réalisation de pièces très délicates ayant des formes compliquées ou devant atteindre une précision exceptionnelle. L'emploi de la machine-outil peut ainsi être considéré comme l'un des stades du progrès technique dans lequel le travail de préparation est de plus en plus complexe et fait intervenir un personnel de plus en plus qualifié, alors que l'exécution elle-même est toujours davantage confiée à des machines dont l'automatisation est sans cesse accrue. L'une des manifestations de cette tendance est l'apparition de la commande numérique qui sera étudiée au chapitre 4. Les modèles de machines-outils sont très nombreux; ils permettent d'usiner presque toutes les pièces qui ne présentent pas de difficultés particulières dues à leurs formes ou à leur précision. On peut classer ces modèles, d'une manière générale, en quelques catégories qui sont les suivantes: machines-outils ordinaires, machines-outils spéciales, machines-outils nouvelles, machines-outils utilisant des procédés d'usinages nouveaux. À part celles qui sont rangées dans la dernière catégorie, les machines-outils utilisent ce qu'on appelle couramment une *chaîne cinématique* qui transforme les mouvements de rotation d'un ou de plusieurs moteurs en mouvements de translation et de rotation. Si l'on considère la question à partir de cette idée simple, on comprend pourquoi il existe une sorte de rivalité permanente entre des catégories de machines pourtant différentes. Par exemple, un tour peut percer et aléser, une fraiseuse peut exécuter des travaux de tour et de perçage. En fait, l'industrie mécanique a inventé de nombreux dispositifs permettant d'accroître les possibilités d'usinage, soit pour économiser l'achat de machines, soit pour éviter, dans un usinage déterminé, des démontages et des remontages coûteux. Inversement, la spécialisation permet, aussitôt que se présentent des séries suffisantes, de mieux répartir les charges entre les différentes machines d'un atelier. On peut dire alors que la dynamique des machines-outils est prépondérante par rapport à la cinématique en ce sens que la puissance des moteurs de machines, la résistance de celles-ci aux chocs et aux vibrations, leur aptitude à usiner rapidement, leur architecture même, entrent pour beaucoup dans le choix que doit faire l'opérateur pour usiner une pièce.

Compte tenu de ces considérations générales, pour une classification des machines-outils, on peut revenir à la notion d'outil tournant ou non.

Machines dont l'outil — ou les outils — ne tournent pas: Tours - Raboteuses — Étaux-limeurs — Mortaiseuses.

Machines dont l'outil — ou les outils — tournent: Fraiseuses-perceuses — Machines à tailler les engrenages — Aléseuses.

Machines utilisant des meules: Machines à rectifier.

Les normes françaises, comme les projets de normes français, ont adopté à peu près ce principe; toutefois, l'apparition de machines nouvelles, comme les *centres d'usinage*, ou de machines basées sur des principes nouveaux, comme les machines à électroérosion, a conduit et conduira encore certainement à des modifications dans ce classement. Il semble qu'en associant les principes indiqués plus haut: machines classiques, nouvelles, etc. et ceux relatifs à l'outil, on puisse présenter dans l'avenir un classement complet et cohérent des machines.

2. LES TOURS

Les tours constituent une famille de machines-outils comportant un assez grand nombre de modèles, allant du tour parallèle à charioter et à fileter jusqu'aux tours automatiques à une ou plusieurs broches, en passant par les tours revolvers et les tours verticaux.

2.1. Tour parallèle. — C'est l'une des machines-outils les plus anciennes, en dehors des tours de potier qui permettent le modelage d'objets en terre à l'aide d'un plateau tournant, ou de l'« ignitérébrateur », déjà signalé plus haut (fig. III-1 a). Le tour parallèle, très simple à l'origine, comportait, en général, un seul outil ; la pièce à usiner était fixée entre pointes ou prise en mandrin par des procédés simples ; les mouvements étaient engendrés par une courroie de transmission reliée à un moteur (fig. III-1 b). De nombreux perfectionnements ont amené le tour parallèle à sa forme actuelle qui change assez peu, mais dont tous les éléments sont améliorés pour supprimer les vibrations et réduire l'influence des élévations de température.

Après une longue évolution, à peu près dans tous les modèles, le mouvement est, désormais, donné par un moteur incorporé au bâti ; les vitesses et les avances sont obtenues à partir de boîtes de vitesses et d'avances et de dispositifs gradués, d'un accès facile pour l'opérateur. Par ailleurs, les filetages qui représentaient autrefois l'une des opérations les plus difficiles à réaliser sur les tours, sont obtenus d'une manière presque automatique grâce aux dispositifs qui font partie intégrante de la machine. On citera, de plus, pour mémoire et avant d'y revenir ultérieurement, la possibilité d'équiper les tours parallèles d'une commande numérique et d'automatiser ainsi leurs mouvements d'une manière complète.

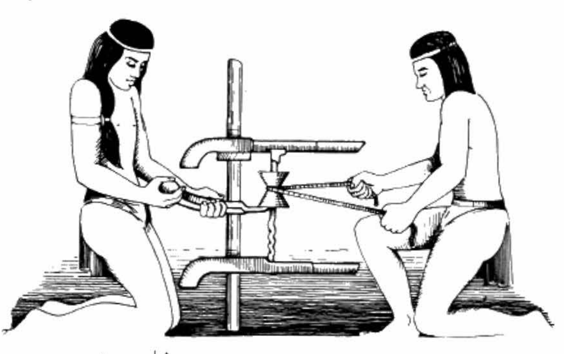


Fig. III-1 a

Ignitérébrateur
(*Sculfort*)

Fig. III-1 b

(*Sculfort*)

2.1.1. Éléments essentiels d'un tour parallèle. —

Ce sont les suivants :

— Un bâti qu'on appelle souvent *banc* et qui est, en général, en fonte, et parfois en acier soudé ; ce banc repose sur le sol par deux pieds suffisamment écartés pour permettre le montage de tous les éléments nécessaires sur le banc du tour et suffisamment rapprochés pour éviter les flexions. Le pied avant (à gauche de l'opérateur en position de travail) est creux et contient, en général, le moteur d'entraînement, la boîte de vitesses et l'appareillage électrique ; dans certains cas, toutefois, l'appareillage électrique est placé dans une armoire indépendante. Le banc porte sur toute sa longueur des glissières qui sont destinées à guider les déplacements du traînard et de la poupée mobile (fig. III-2).

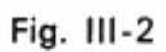
— Une *poupée fixe* qui se trouve placée au-dessus du moteur et de la boîte de vitesses.

— Une *poupée mobile* qui se déplace le long du banc en étant guidée par les glissières du banc.

— Un *traînard* qui porte les chariots et les dispositifs de transmissions de mouvement des chariots. Il y a parfois une confusion de termes entre traînard et tablier ou cuirasse ; on s'accorde, toutefois, assez souvent pour appeler tablier la partie qui supporte les organes de transmission et traînard le dispositif portant le chariot transversal et l'on admet aussi que l'ensemble traînard-tablier constitue le chariot animé du mouvement longitudinal. Bien entendu, le chariot transversal se déplace dans un sens perpendiculaire aux glissières du tour.

Il est nécessaire de reprendre ces éléments pour en préciser quelques détails.

Les glissières doivent être rectilignes, comme on l'a déjà signalé, pour remplir leur rôle de guidage ; elles jouent, de plus, le rôle de base de départ pour l'implantation du tour. C'est pourquoi, lorsqu'on installe le tour sur ses fondations, on vérifie à l'aide d'un niveau que chaque glissière est horizontale et qu'elles sont également toutes les deux dans le même plan horizontal. On a déjà indiqué plus haut l'intérêt du guidage étroit qui, pour être bien résolu, a conduit à l'emploi de glissières prismatiques, l'arête supérieure du prisme pouvant être réalisée plus facilement sous une forme rectiligne. Les traînards sont ainsi guidés par la glissière avant et leur partie arrière repose sur la partie plane



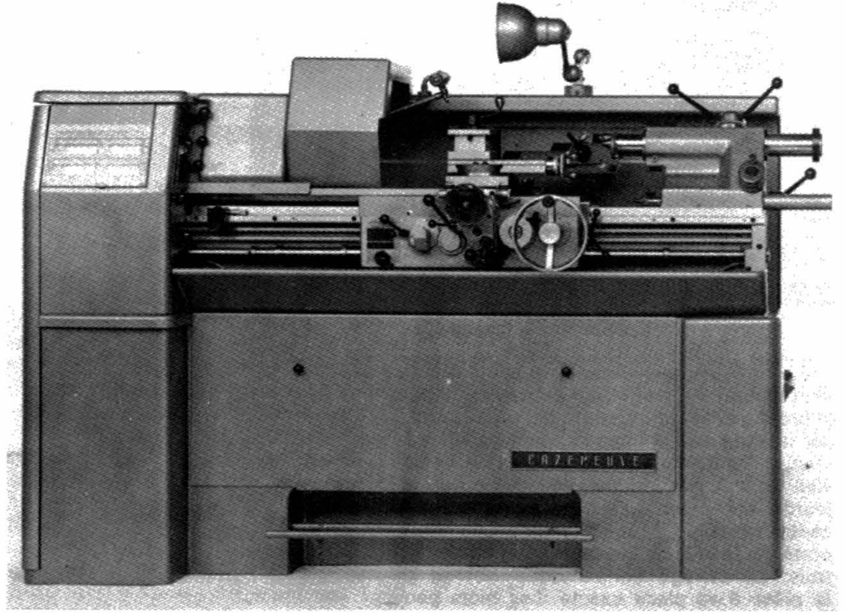


Fig. III-2

Tour parallèle. La poupée fixe est à gauche, masquée par un protecteur ; la poupée mobile est à droite devant les deux leviers servant à la déplacer ; le traînard est à la partie centrale du banc ; il porte le chariot longitudinal que l'on déplace au moyen d'une manivelle, et le chariot transversal que l'on aperçoit en-dessous et légèrement à gauche de la lampe
(*Cazeneuve*)

du banc de manière à éviter les porte-à-faux. La contre-poupée peut aussi être guidée prismatiquement, mais cette obligation n'est pas aussi grande que pour le traînard car les déplacements de la contre-poupée sont moins fréquents et moins importants.

La poupée a comme pièce essentielle la broche qui reçoit le mouvement du moteur, par l'intermédiaire du train d'engrenages, et le communique à la pointe vive ou au plateau. La broche doit être en acier spécial très résistant; elle est percée dans toute sa longueur lorsqu'on prévoit le passage de barres à usiner. À chaque extrémité, elle est munie d'une butée, en général butée à billes destinée à l'empêcher de prendre un mouvement longitudinal qui serait préjudiciable à l'exécution des usinages, et elle repose sur des paliers dont l'importance ne cesse de croître depuis que les vitesses de rotation augmentent. On a évoqué plus haut les diverses solutions utilisées : contact direct avec les paliers dans le cas des paliers lisses, roulements à billes, à rouleaux ou à aiguilles et, depuis quelque temps, paliers fluides.

L'une des grandes précautions à prendre consiste à éviter au maximum tout effort d'inertie. Or, pour entraîner la broche, il faut monter sur elle des engrenages; on limite leur nombre et on les choisit le plus légers possible. L'entraînement de la broche est obtenu avec la boîte de vitesses qui est assez semblable à celle des boîtes de vitesses d'automobiles (fig. III-3) ; au moyen de leviers ou de dispositifs automatiques variés, on obtient la vitesse que l'on désire. Dans les modèles modernes, les vitesses peuvent varier d'une façon continue grâce à l'action de moteurs spéciaux sur la broche; la commande se fait alors par l'intermédiaire d'une manette se déplaçant devant un cadran.

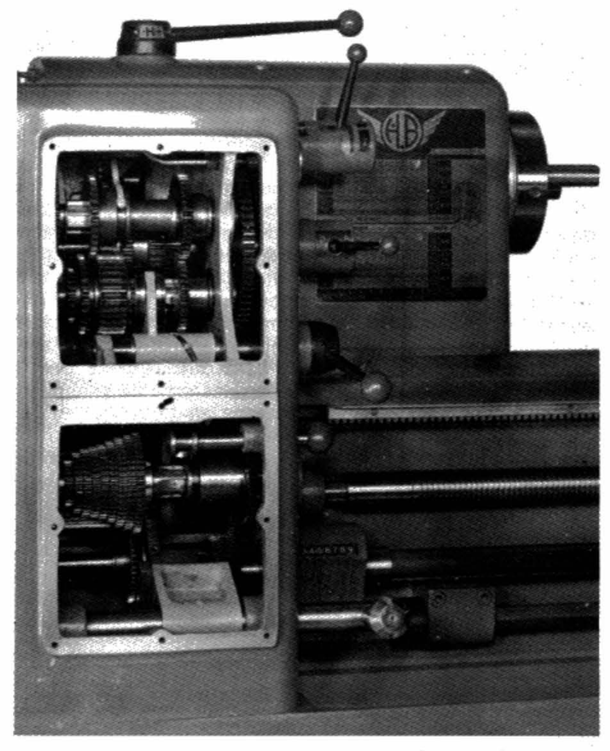


Fig. III-3 — Boîte de vitesses (*Draeger-Cazeneuve*)

Il est nécessaire de bien fixer sur le tour la pièce que l'on veut usiner; à cet effet, on utilise la pointe vive montée sur la broche et la contrepointe et l'on s'assure que l'axe formé par la ligne des pointes est bien parallèle à la glissière du chariot. Toutefois, il peut arriver que l'emploi de la pointe vive ne soit pas indiqué, soit parce que la pièce est trop lourde, soit parce qu'il n'est pas possible de pratiquer un centre sur elle. On utilise alors un mandrin à mors qui est porté par la broche; les mors sont, en général, au nombre de trois. Le serrage concentrique obtenu permet de fixer la pièce à sa place exacte. Les mors peuvent être indépendants, auquel cas il faut régler le serrage de chacun d'eux de manière à ne pas excentrer la pièce; ils peuvent être aussi synchronisés, ce qui permet de réaliser le serrage en une seule opération.

Quand la pièce est entre pointes, il est nécessaire d'assurer son entraînement; à cet effet, on fixe sur elle une pièce appelée *toc* qui est une simple tige munie à son extrémité d'un anneau à travers lequel passe la pièce et qu'on fixe sur elle au moyen d'une vis. Le plateau fixé à l'extrémité de la broche porte un doigt qui, venant en contact avec le toc, entraîne la pièce en rotation. On peut également utiliser un mandrin à mors qui saisit l'extrémité de la pièce et assure sa rotation.

Dans le cas où la pièce est « en l'air », elle est entraînée par le plateau sur lequel elle est montée.

Lorsque la pièce, montée entre pointes, a une longueur assez grande, elle risque de subir des flexions dues à la fois à son poids et à l'effort exercé sur elle lors de la coupe. Pour éviter de telles flexions, on utilise des dispositifs appelés *lunettes* qui sont des anneaux supportés par un socle monté sur le banc. Si la lunette reste en place, on dit qu'elle est fixe. Il peut être nécessaire de la déplacer pour qu'elle exerce son action de soutien sur tout le parcours de la coupe : dans ce cas, elle est entraînée avec l'organe de transmission de mouvement du chariot et elle prend le nom de « lunette à suivre ».

Pour mémoire, on signalera, que, pour l'utilisation des pointes et des contrepointes, la pièce doit subir un usinage consistant en une préparation des logements de ces pointes, (ils sont appelés des centres). Les emplacements et les formes des centres doivent être usinés avec soin. Les emplacements matérialisent l'axe de rotation de la pièce; s'ils étaient décalés, on n'obtiendrait pas de pièces de révolution. Quant à leur forme, elle doit être telle que les surfaces des pointes, qui sont coniques, reposent à peu près complètement sur celles des centres de manière à éviter des déformations ou des ruptures de centres. Des machines spéciales permettent l'usinage des centres. On signalera également que la contrepointe doit pouvoir être décalée par rapport à la ligne des centres, pour permettre l'usinage de surfaces coniques; cette possibilité est d'ailleurs réservée seulement à l'usinage des cônes de faible angle au sommet; dans les autres cas, il devient nécessaire d'utiliser des reproducteurs.

2.1.2. L'outil et ses chariots. — L'outil est amené à recevoir un déplacement longitudinal et un déplacement transversal.

En ce qui concerne le déplacement longitudinal, celui-ci entraîne l'ensemble du traînard et peut être obtenu de deux manières : par barre de chariotage ou par vis mère. L'entraînement par barre de chariotage ne donne qu'un mouvement de translation dont le déplacement n'est pas contrôlé avec précision sur tout son parcours; au contraire l'entraînement par vis mère est plus précis car une rotation de 360° de la vis donne un déplacement égal au pas de celle-ci (c'est pourquoi, d'ailleurs, cette méthode est utilisée pour l'usinage des filetages). Dans certains tours très modernes, on a supprimé la barre de chariotage, les constructeurs estimant que les vis mères étaient actuellement assez résistantes pour supporter les travaux d'ébauche; toutefois, beaucoup de modèles conservent encore la barre de chariotage dont on va rappeler le fonctionnement.

Le banc porte une crémaillère fixe sur laquelle se trouve en prise un engrenage solidaire du chariot et qui entraîne celui-ci dans sa rotation. De son côté, la barre de chariotage porte un pignon dont la rotation est commandée par celle de la barre mais qui peut également coulisser sur elle grâce à une rainure. De cette manière le pignon peut être amené en prise avec un train d'engrenages et, dans ce train, avec la roue correspondant à la vitesse désirée. La roue de ce train ainsi choisie vient en prise avec l'engrenage qui roule sur la crémaillère et entraîne le chariot. Si l'entraînement a lieu au moyen de la vis mère, le dispositif est beaucoup plus simple : il suffit qu'un écrou porté par le chariot soit en prise avec la vis mère : l'écrou est en deux parties qu'il suffit de séparer pour arrêter le mouvement.

Des dispositifs de sécurité évitent que le chariot soit embrayé à la fois sur la vis mère et sur la barre de chariotage.

Le déplacement transversal de l'outil est réalisé par un chariot transversal monté sur le traînard et qui peut être

orienté suivant plusieurs directions pour permettre l'usinage de pièces variées; assez souvent, ce chariot n'est pas commandé automatiquement, mais il est extrêmement facile de réaliser une automatisation à partir du mouvement du traînard.

Le porte-outil a connu des améliorations constantes; autrefois, il était constitué d'un bloc carré portant en haut et en bas des plaques horizontales entre lesquelles on insérait l'outil en réglant sa hauteur au moyen de cales d'acier. On pouvait ainsi monter quatre outils à la fois, mais le réglage était une opération fastidieuse et longue. On a maintenant de plus en plus tendance à utiliser des porte-outils à came dont la hauteur se règle par la seule manœuvre d'un levier. De nombreux dispositifs ont été mis au point dans l'industrie car la préoccupation dominante ne cesse d'être la réduction au minimum des temps morts.

La mise à hauteur de la pointe de l'outil, tout en étant importante, laisse malgré tout place à une certaine tolérance; en effet, l'erreur commise sur l'usinage par un outil légèrement trop haut ou trop bas est infiniment petite par rapport au rayon. Il n'en serait pas de même si l'outil, au lieu d'être décalé dans le sens de la hauteur, l'était dans le sens latéral. Dans certains cas, on estime préférable de placer l'outil légèrement plus haut que le plan diamétral de la pièce; c'est par exemple, ce que l'on prévoit pour les fortes passes. En général aussi, l'arête est dirigée vers le haut, excepté pour les saignées ou lorsque l'outil est monté sur un porte-outil arrière, auquel cas l'arête est dirigée vers le bas.

2.1.3. Les opérations effectuées sur le tour. — Les opérations de base effectuées sur un tour sont le dressage de faces planes, l'usinage de pièces de révolution par chariotage et le filetage. D'autres opérations annexes peuvent être exécutées telles que le perçage ou l'alésage, mais ce ne sont pas des travaux fondamentaux. En plus, l'emploi d'accessoires variés permet de fraiser, de rectifier et même de brocher; de telles opérations sont, en fait, peu courantes mais l'expérience a prouvé qu'elles pouvaient être utiles dans certaines occasions (travaux d'études, désir de ne pas acheter trop de machines-outils pour des travaux peu courants, etc.).

1° *Dressage des faces et tronçonnage.* — Le dressage des faces est, en général, opéré sur des pièces cylindriques dont l'axe est parallèle à celui de la broche et à l'aide du chariot transversal qui est déplacé soit à la main, soit automatiquement. L'outil utilisé peut être soit un outil ordinaire de chariotage, soit un outil dit outil « couteau » dont l'arête est plus longue. Cette opération ne demande pas de précautions particulières et la qualité du travail dépend avant tout de la rectitude et de l'orientation des glissières du chariot. Le dressage des faces est une opération fondamentale, au même titre que le chariotage, pour apprécier le bon fonctionnement d'une machine.

Le tronçonnage peut être considéré comme une forme de dressage; il consiste à sectionner la pièce suivant un plan perpendiculaire à l'axe des pointes. Les outils à utiliser sont des outils dits « à saigner » qui peuvent couper sur l'avant et sur les surfaces latérales. Cette opération nécessite une lubrification abondante. De plus, lorsque l'outil arrive à bout de course, c'est-à-dire lorsque le tronçonnage est terminé, la résistance à l'effort de coupe est supprimée instantanément et cela risque d'engendrer des réactions sur le porte-outil; il convient de prendre garde à cet inconvénient.

2° *Chariotage et reproduction.* — Le chariotage est une opération courante pour usiner des pièces de révolution qui sont des solides ayant, en l'occurrence, un axe confondu avec la ligne des pointes et engendrés par la rotation d'une courbe autour de cet axe. En général, les courbes sont planes: lignes droites, circonférences, etc.

Pour exécuter ces travaux, on fait déplacer longitudinalement et transversalement le chariot (soit à la main, soit automatiquement). Les travaux d'ébauche sont réalisés avec une avance et une profondeur de passe fortes et avec une vitesse moyenne. Dans la finition, on utilise la vitesse de coupe la plus grande possible, compte tenu de la machine et de la matière usinée, en réduisant autant qu'il est nécessaire l'avance et la profondeur de passe.

Par la simple opération de chariotage on obtient des pièces avec une très grande précision et un excellent état de surface au point que, dans certains cas, on peut éviter tout autre travail de finition (comme la rectification par exemple). Cependant, l'outil laisse sur la surface de la pièce des traces d'hélice correspondant à la vitesse et à l'avance. Si les éléments d'hélice sont peu profonds et très rapprochés, la précision définitive peut être obtenue par le seul travail de tour; c'est ainsi que les spécialistes éprouvés du tour Cazeneuve arrivent souvent à obtenir un poli de la pièce suffisant pour qu'on n'ait pas besoin d'autres opérations de finition. Évidemment, pour un poli parfait correspondant à la suppression de ce qu'on appelle les erreurs microgéométriques, on doit admettre la nécessité d'une opération de rectification, de rodage ou de polissage.

On peut monter parfois plusieurs chariots sur un tour parallèle. La combinaison des travaux ainsi réalisés ne pose pas d'autres problèmes que l'entraînement des chariots qui doit se faire comme celui des chariots portant l'outil principal.

Le travail par reproduction (fig. III-4) est une forme de chariotage susceptible d'accroître considérablement les possibilités du tour. En effet, pour usiner des surfaces de révolution à partir de courbes ayant des formes complexes, il serait difficile de régler les mouvements longitudinal et transversal des chariots à la main ou automatiquement. C'est pourquoi on utilise des reproducteurs qui ont la forme de la courbe génératrice de la surface. Ces reproducteurs sont en acier ou en matière résistante; leur profil permet d'appuyer sur eux un palpeur relié par un mécanisme au chariot transversal, de telle sorte que la position de

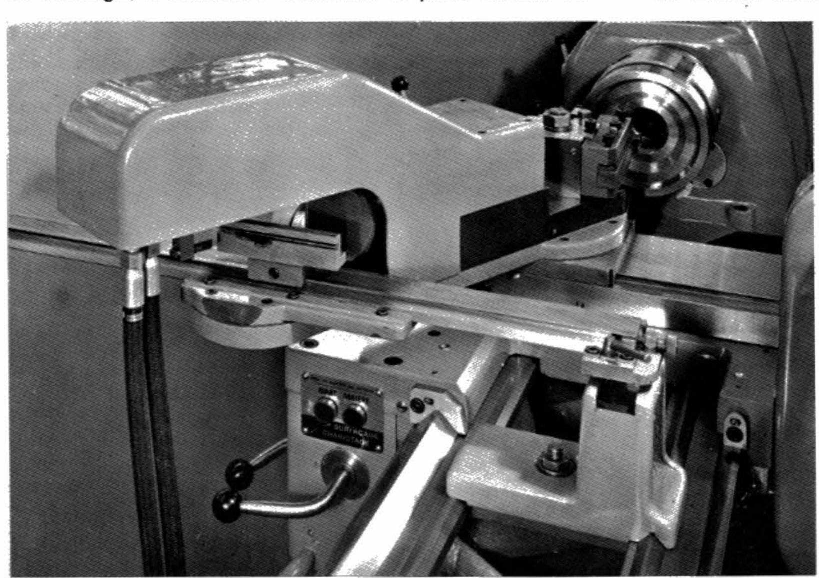


Fig. III-4

Reproducteur hydraulique; ici: reproduction frontale par gabarit plat (*H. Favroult — RAMO*)

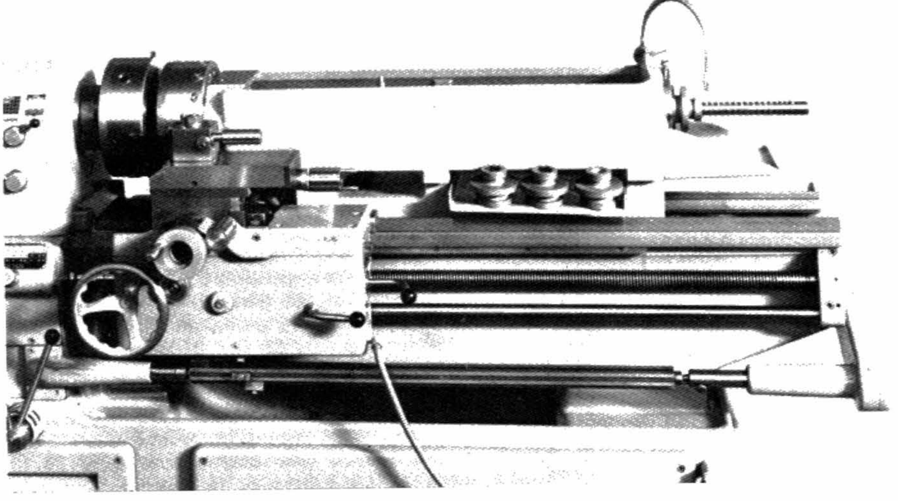




Fig. III-5 — Appareil à brocher monté sur tour (*RAMO*)

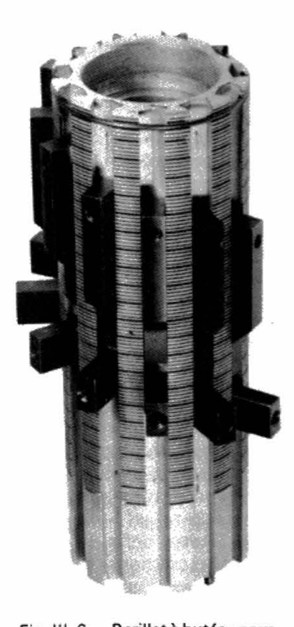


Fig. III-6 — Barillet à butées pour exécution de cycles automatiques (*Draeger — Cazeneuve*)

celui-ci correspond à chaque instant à celle que doit avoir le chariot longitudinal. La conjugaison de ces deux mouvements permet d'imprimer à l'outil le déplacement correspondant à la courbe qu'il faut reproduire et de donner à la pièce un profil conforme à cette courbe.

Ces reproducteurs ont le plus souvent la forme de droites, de circonférences ou d'une association de ces deux courbes. Ils ont tantôt les dimensions de la courbe, tantôt des dimensions plus grandes ou plus petites suivant la nature de l'usinage ; il y a, évidemment, intérêt à avoir des dimensions plus grandes afin que les erreurs locales qui existent inévitablement sur le reproducteur soient minimisées dans l'usinage ; on ne peut pas, d'ailleurs, espérer que ces erreurs disparaissent complètement. Une autre cause d'erreurs non négligeable et à laquelle on n'a pas toujours prêté une attention suffisante est celle causée par le contact entre le palpeur et le reproducteur ; le palpeur doit, en effet, s'appuyer sur celui-ci avec une pression constante de manière à maintenir le déplacement de l'outil dans les tolérances fixées pour l'usinage. Cette condition est assez difficile à réaliser par des moyens purement mécaniques. On a essayé d'employer des palpeurs hydrauliques qui donnent des résultats meilleurs et, tout récemment, on a tenté de réaliser des palpeurs électromagnétiques qui, a priori, devraient éviter des variations de pression sur le reproducteur. Malgré ces progrès indiscutables, il semble illusoire d'espérer que les erreurs soient inférieures à 0,01 mm.

Parmi les opérations annexes susceptibles d'être effectuées sur un tour, on peut citer le perçage et son complément indispensable l'alésage.

3° *Perçage et alésage.* — Le perçage est réalisé assez facilement en montant un foret dans le fourreau de la contre-pointe ; l'avance du foret est alors obtenue en déplaçant ce fourreau, tout comme on ferait avancer la contre-pointe elle-même. Donc, contrairement à ce qui passe avec une perceuse, dans le cas du tour c'est la pièce qui tourne et le foret qui reste fixe. La profondeur de perçage est limitée par l'avance du fourreau de la contre-pointe. On obtient par ce procédé des perçages excellents.

L'alésage est exécuté par un procédé plus courant, en ce sens que l'outil à aléser est monté dans le porte-outil ; la pièce est montée « en l'air » et l'outil doit avoir la longueur nécessaire pour que l'alésage soit possible de bout en bout. En fait, les conditions de travail ne sont pas bonnes car l'outil à aléser présente toujours un porte-à-faux très marqué. Si l'alésage à pratiquer est long, il peut être préférable de monter la pièce à aléser sur le tablier et de la faire traverser par une véritable barre d'alésage montée entre pointes et entraînée par la broche, tandis que la pièce reçoit le mouvement longitudinal nécessaire. Le travail est ainsi à peu près identique à celui qu'exécuterait une aléseuse.

4° *Accessoires des tours.* — Les accessoires susceptibles d'être montés sur tour sont de plusieurs natures : les uns se montent à la place des porte-outils, d'autres servent à faciliter l'usinage aussitôt que se présentent des séries et permettent de conduire des usinages donnés sans avoir recours à la commande numérique. Dans l'impossibilité de décrire tous ces accessoires, on se contentera de mentionner les suivants :

Appareil à rectifier les filets de vis ; il se monte sur un chariot spécial et la meule reçoit d'un moteur spécial le mouvement de rotation nécessaire ; cet appareil est peu employé.

Appareil à fraiser : comme pour les précédents, il s'agit d'un appareillage peu utilisé.

Appareil à brocher : celui-ci (fig. III-5) est monté dans la contre-pointe, comme le serait un foret de perçage, et le brochage est obtenu par le retrait du fourreau vers l'arrière.

Les accessoires qui ne sont pas destinés à remplacer des outils consistent essentiellement en des dispositifs destinés à faciliter l'usinage. Les plus utiles sont les butées réglables (fig. III-6) qui permettent d'arrêter un déplacement avec exactitude ; d'autres servent à mettre à leur position exacte plusieurs outils lorsqu'il en est prévu l'emploi et à réaliser des cycles automatiques. Un autre appareil intéressant est une poupée mobile (fig. III-7) que l'on monte sur le banc et qui est munie d'un moteur ; les perçages sont alors beaucoup plus faciles à exécuter qu'en utilisant la contrepointe.

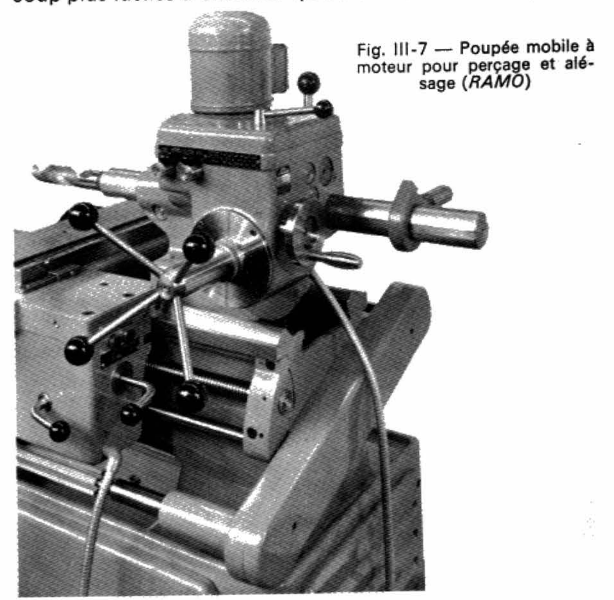


Fig. III-7 — Poupée mobile à moteur pour perçage et alésage (*RAMO*)

Un constructeur a obtenu des perçages de 40 mm de diamètre sur une longueur de 300 mm.

On conçoit, a priori, que le nombre d'accessoires utilisables puisse être aussi grand qu'on le désire du moment qu'on dispose, sur la machine, des deux mouvements fondamentaux de translation et de rotation. Il est intéressant de constater que la mode des accessoires tend à revenir, alors qu'elle avait, au contraire, tendance à régresser au moment où les fabrications en série ont commencé à prendre de l'importance. La raison en est, sans doute, que toute une catégorie d'ateliers, obligés d'accepter des travaux très variés, n'ont pas les moyens de se procurer des machines en nombre suffisant et cherchent, malgré tout, à s'équiper le mieux possible.

5° *Filetage.* — Le filetage est une des opérations de base des tours parallèles. Il est assez curieux de constater que, dans beaucoup d'ateliers, le nombre des filetages réalisés est relativement faible et que, malgré tout, sur tous les tours, on se réserve toujours la possibilité d'usiner des filetages de grandes longueurs; en fait, il n'y a pratiquement pas de tours à charioter en service sans que ceux-ci disposent d'une vis mère qui, en général d'ailleurs, a une longueur qui dépasse les exigences que l'atelier pourrait formuler.

La vis mère est une pièce difficile à usiner car elle consiste en une barre assez longue dont les extrémités sont lisses; elles permettent le montage sur le tour, ainsi que la liaison cinématique avec le moteur. Les filets sont, en général, carrés bien que ce ne soit pas une obligation.

L'usinage d'une vis mère est une opération délicate car, en usinant les filets, on imprime inévitablement à la barre des torsions plus ou moins importantes; on peut fileter à l'outil, à la fraise ou par tout moyen qu'on désire. Après la trempe, il est indispensable de rectifier les filets pour conserver le pas avec une précision suffisante. Lorsqu'il s'agit de tours à fileter, on est presque toujours conduit à vérifier la vis pas par pas et à établir une règle de correction des erreurs qui n'ont pu être éliminées. La vis mère est en liaison avec le tablier au moyen d'un écrou qui peut s'ouvrir ou se fermer pour débrayer ou embrayer sur elle. Les études faites sur la question montrent qu'en vertu des réactions élastiques, la vis mère et son écrou sont rarement en prise sur plus d'un filet; si donc l'écrou est assez long, les contacts changent suivant que l'usinage entraîne des réactions plus ou moins grandes, mais il s'établit une moyenne entre les contacts et la précision nécessaire peut être obtenue.

L'outil utilisé est choisi en fonction du travail à exécuter; il peut couper un seul flanc ou les deux flancs de la pièce à fileter; dans le premier cas, l'usinage est plus soigné, mais il peut y avoir des différences entre les précisions de chaque flanc; dans le deuxième cas, c'est le contraire que l'on constate. L'usinage se poursuit par passes successives jusqu'à ce que le fond de filet soit atteint. Pour que ces passes conservent leur précision, il faut qu'après chacune d'elles, l'outil, ramené en arrière en vue de l'exécution de la passe suivante, se place exactement à la position voulue; c'est ce qu'on appelle la retombée. Les tours modernes ont presque tous un dispositif de retombée dans le pas (fig. III-8).

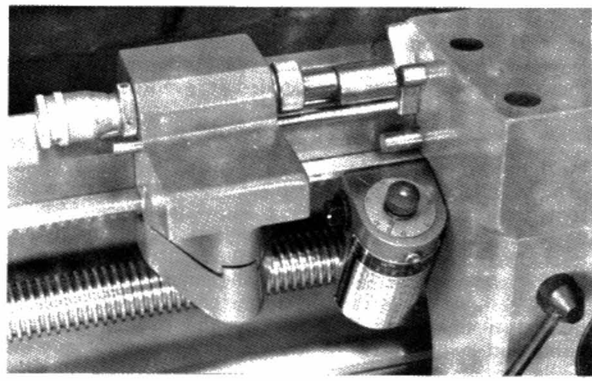


Fig. III-8 — Appareil de repérage pour retombée dans le pas (*Draeger — Cazeneuve*)

À l'époque où les tours étaient moins perfectionnés, il était nécessaire d'utiliser des trains de roues pour réaliser les vitesses à imprimer au chariot à partir de la vis mère; la formule générale est toujours représentée par la formule :

$$\frac{p}{P} = \frac{N}{n}$$

où p est le pas de la vis à usiner, P le pas de la vis mère, N le nombre de dents de la roue qui entraîne (roue menante) et n le nombre de dents de la roue entraînée (roue menée). Pour réaliser cette égalité, étant donné qu'on connaît p et P, il convient de trouver une association de roues telles que l'on obtienne N et n; presque toujours, il est nécessaire d'intercaler un certain nombre de roues, ce nombre dépendant des roues dont on dispose et de la valeur du pas p par rapport au pas P de la vis mère.

D'une manière générale, en France et en Europe, les pas à réaliser sont métriques, ce qui facilite le choix des roues. S'il est nécessaire d'usiner un pas en pouces, on considère qu'un pouce vaut 25,4 mm; des calculs très simples montrent qu'on est toujours amené à utiliser une roue de 127 dents $\left(\frac{254}{2}\right)$.

À l'époque actuelle, les tours sont munis de boîtes très complètes, dites boîtes de pas et d'avances. Dans les boîtes telles que Norton, par exemple (fig. III-9), un groupe de roues montées sur l'arbre de la vis mère forme un véritable cône; ce cône est solidaire d'un pignon long (qui transmet le mouvement de la broche) au moyen d'un pignon S; suivant sa position, celui-ci engrène avec une roue qui donne immédiatement le rapport entre les rotations de la broche et de la vis mère.

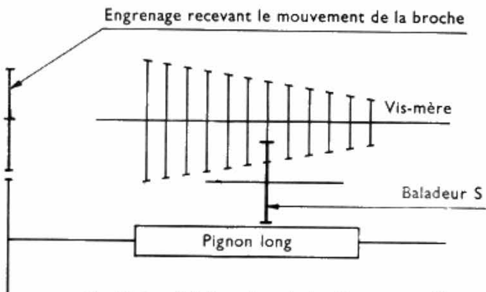


Fig. III-9 — Schéma d'une boîte Norton pour filetage

2.1.4. L'emploi des tours parallèles.

— Les tours parallèles peuvent avoir des dimensions très différentes, depuis le tour d'établi jusqu'aux grands tours ayant plusieurs mètres de hauteur de pointes et parfois plusieurs dizaines de mètres de longueur de banc. D'autres tours parallèles sont dits « à banc rompu » lorsque le banc ne se prolonge pas jusqu'au pied portant la boîte de vitesses, cela afin de permettre à des objets encombrants d'être montés « en l'air » pour être usinés.

Les tours parallèles, en raison de la vogue qu'ils connaissent toujours, doivent faire l'objet de vérifications au moment de leur mise en service et à certains intervalles afin de s'assurer que leur qualité n'a pas été altérée par l'usage. La normalisation de ces essais fait, actuellement, l'objet de travaux internationaux, mais depuis longtemps, en France tout au moins, des conditions unifiées ont été adoptées par l'ensemble de l'industrie mécanique. Ces conditions font l'objet d'un ouvrage dans lequel la réception des tours prend une place importante. On s'accorde à préférer les essais pratiques consistant en un dressage de face, un chariotage de pièces cylindriques et un filetage. Dans le cas où ces épreuves ne peuvent être exécutées, on procède à des contrôles statiques dits « vérifications géométriques » qui ont surtout pour but de s'assurer que le tour a été bien construit, mais ces vérifications ne sauraient donner les mêmes garanties que les épreuves pratiques.

2.2. Tours revolver et tours semi-automatiques.

— On range dans cette catégorie les tours dans lesquels les opérations relativement simples et unitaires, comme celles

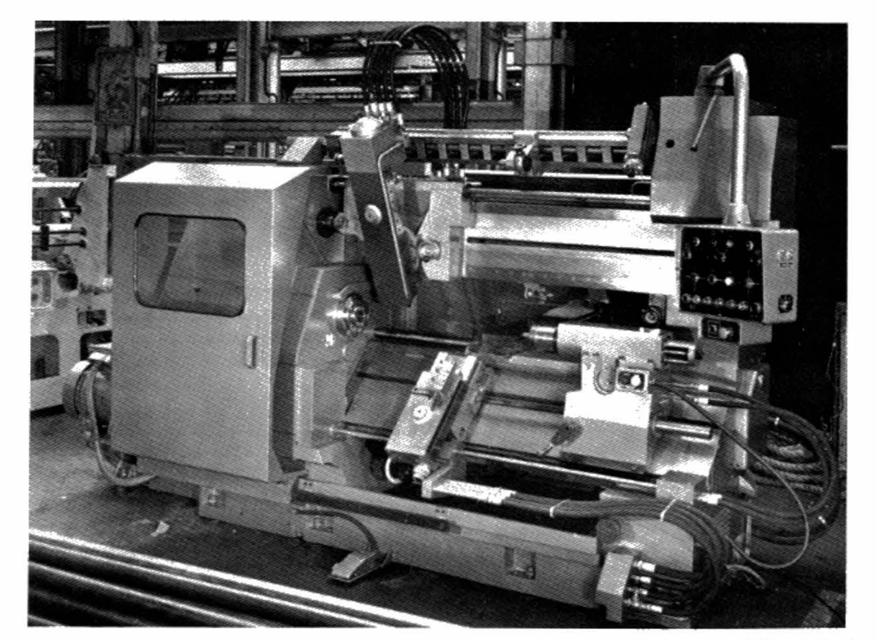


Fig. III-11

Tour transpilote
(*Ernault — Somua*)

exécutées sur des tours parallèles, peuvent être combinées, ces tours pouvant être partiellement automatisées.

On place assez souvent dans une catégorie à part les tours à tourelle revolver dont la caractéristique est d'augmenter le nombre des outils utilisables pour l'usinage (la tourelle tourne d'autant de fractions de tours qu'elle a d'outils). On peut cependant considérer qu'ils font partie du groupe de tours semi-automatiques puisque, même si aucun autre mouvement n'est automatisé, la seule présence d'une tourelle revolver, même commandée manuellement, confère à la machine un caractère de semi-automaticité.

2.2.1. Tours revolver. — Exceptée la présence d'une tourelle revolver à la place d'une contre-pointe, ces machines ressemblent assez aux tours parallèles; cependant, le tour comporte, en plus, un chariot porte-outils, dit chariot transversal, susceptible de recevoir un déplacement longitudinal, et un déplacement transversal. La tourelle est, en général, hexagonale, ce qui permet d'utiliser au moins six outils, un par face; la plupart du temps elle est à axe vertical de telle sorte que les outils se trouvent dans un plan horizontal pour l'usinage (fig. III-10). Parfois, la tourelle est plate, c'est-à-dire à une hauteur faible par rapport au banc. Parfois aussi, elle est cylindrique, mais c'est surtout dans le cas des tours automatiques que cette forme est rencontrée. Le tour revolver ne peut pas travailler entre pointes; il sert à usiner des barres passant à travers la broche, dont l'avance peut être automatique ou réglée à la main, et également des pièces fixées sur un mandrin monté sur la broche (c'est alors un véritable travail « en l'air »).

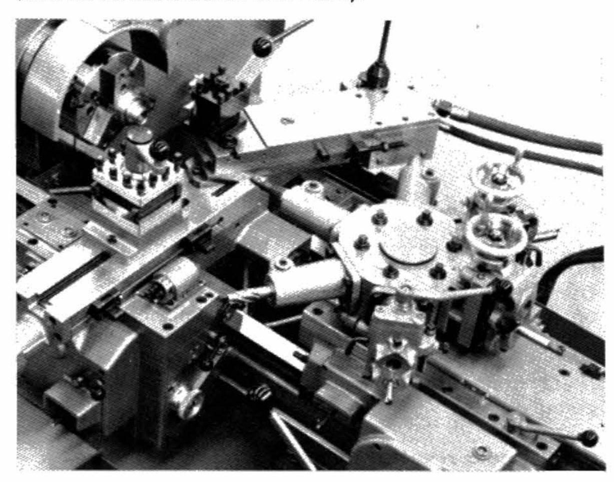


Fig. III-10 — Tourelle plate à axe vertical (*Ernault — Somua*)

En dehors de la tourelle, le tour revolver comporte trois catégories d'éléments :

— des éléments identiques à ceux des tours parallèles, tels que le bâti et le poupée avant;

— des éléments qui présentent quelques variantes par rapport à ceux des tours parallèles, c'est le cas du chariot transversal, des tabliers des chariots, des mécanismes d'avance et du mécanisme de débrayage automatique des avances;

— des éléments qui sont spécifiquement ceux d'un tour revolver; c'est le cas du chariot à déplacement longitudinal portant la tourelle, du mécanisme d'avance et de retour rapide du porte-outil, du chariot transversal, du mécanisme d'avance et de serrage des barres.

Les éléments de la deuxième catégorie n'appellent pas de commentaires spéciaux car il s'agit de dispositifs et de mécanismes assez courants.

En ce qui concerne les éléments de la troisième catégorie on peut faire les remarques suivantes : le chariot portant la tourelle est animé seulement d'un déplacement longitudinal; en effet, les outils portés par chaque face de la tourelle ne peuvent travailler que dans cette direction. L'avance du chariot est, en général, obtenue à l'aide d'un cabestan manié à la main (d'où le terme Capstain adopté par les Anglais). Le cabestan peut être remplacé par un dispositif automatique dans certains tours évolués. Pour exécuter des usinages dans le sens transversal, il a donc été nécessaire d'utiliser un chariot porté par un tablier indépendant. Ce chariot peut être, lui aussi, muni de deux tourelles porte-outils (l'une à l'avant, l'autre à l'arrière) qui ont, en général, quatre faces. L'indépendance du chariot transversal vis-à-vis de la tourelle permet de donner aux deux groupes d'outils qu'ils portent des avances différentes.

Les tours revolver n'ont pratiquement jamais de vis mère et ne peuvent donc permettre d'usiner des filetages comme les tours parallèles. C'est avec des outils montés sur la tourelle qu'on exécute les filetages et, éventuellement, les taraudages.

2.2.2. Tours semi-automatiques. — Dans ces machines une partie notable des éléments reçoit les déplacements nécessaires d'une manière automatique; cette automatisation partielle les place à un stade intermédiaire entre les tours simples, sans automatisation véritable (à part quelques mouvements en nombre très réduit comme pour les tours parallèles), et les tours entièrement automatiques dans lesquels l'intervention humaine disparaît aussitôt que la machine est mise en marche. Cette catégorie comprend évidemment les tours revolver aussitôt que les déplacements de la tourelle et du chariot transversal, ainsi que la rotation de la tourelle sont synchronisés.

L'automatisation partielle est intéressante pour une très grande catégorie de travaux de moyenne série ; grâce à des dispositifs spéciaux, le rendement de ces machines atteint une valeur qui leur permet souvent de soutenir la concurrence avec des tours automatiques multibroches. Par exemple, la famille de tours semi-automatiques dite « Pilote » qui comprend de nombreuses variantes : transpilote, pilote S, etc. (fig. III-11) a été précisément établie pour pénétrer dans l'industrie automobile, en concurrence même avec des machines spéciales.

Parmi ces dispositifs, le plus intéressant est l'appareil à reproduire car il remplace plusieurs outils. Ainsi qu'on l'a déjà exposé, la seule difficulté réelle consiste à obtenir une pression constante du palpeur sur le reproducteur et, malgré toutes les recherches, la précision atteinte est toujours limitée par cette difficulté pour l'instant.

Les reproducteurs à dispositif hydraulique sont très utilisés. Il est donné, ci-dessous, la description d'un de ces dispositifs (fig. III-12). On fixe à la vis de commande du chariot transversal la tige d'un piston *C* qui se déplace dans un cylindre où de l'huile est envoyée par une pompe à engrenages *G*. La pression d'huile est maintenue constante dans la partie *a* grâce à une soupape tarée *B* ; la pression dans la partie *b* peut varier sous l'action de la soupape *A*. Lorsque le palpeur *F* n'est pas au contact du reproducteur, la soupape *A* s'ouvre sous l'action d'un ressort, la pression *b* diminue et le piston *C* est poussé vers la droite jusqu'à ce que le palpeur entre en contact avec le reproducteur *D*. À ce moment, le palpeur agit sur la soupape *A* et l'équilibre des pressions *a* et *b* se rétablit. L'équilibre ainsi obtenu se maintient tant que le reproducteur ne présente pas une variation de forme ; s'il s'en présente une, la soupape *A* s'ouvre ou se ferme, suivant la forme du reproducteur et le piston ainsi que le chariot sont déplacés de manière à ce que l'équilibre entre *a* et *b* soit rétabli.

On ne peut guère faire agir le palpeur lorsque la pente du reproducteur par rapport à sa forme générale dépasse 60° ; aussi est-on obligé d'utiliser des dispositifs spéciaux pour reproduire des épaulements droits ou très inclinés. On utilise volontiers un dispositif mû par électroaimant qui agit sur le débrayage de la barre tout en commandant le recul de l'outil.

Un autre dispositif intéressant permet de réduire la vitesse de rotation quand le diamètre de la pièce diminue au cours de l'usinage et de conserver une vitesse de coupe constante. Ce dispositif est particulièrement utile pour obtenir de bons états de surface.

L'automatisation dans les tours semi-automatiques joue, évidemment, un rôle primordial ; elle conduit à mettre en œuvre un équipement assez complexe puisqu'il faut réaliser non seulement des mises en marche, des arrêts, des variations de vitesse d'organes très variés, mais aussi assurer la coordination de tous les mouvements ainsi produits. Cet ensemble d'opérations a pu être réalisé grâce à des circuits aboutissant à des fils branchés sur un tableau à fiches ; la mise en place des fiches permet de réaliser les connexions nécessaires (fig. III-13).

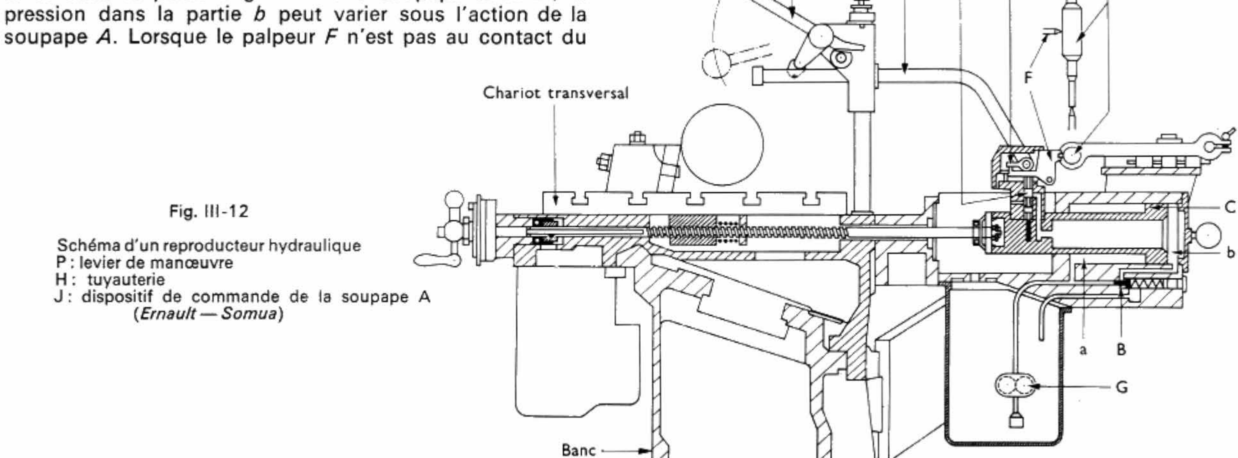


Fig. III-12

Schéma d'un reproducteur hydraulique
P : levier de manœuvre
H : tuyauterie
J : dispositif de commande de la soupape A
(*Ernault — Somua*)

L'apparition de la commande numérique a simplifié, jusqu'à un certain point, les équipements utilisés et a accru notablement l'automatisation puisque toutes les indications nécessaires au fonctionnement et à la synchronisation des mouvements peuvent être données par une bande perforée. L'intérêt de la commande numérique, comme on le verra plus loin, apparaît d'autant plus que les travaux à exécuter sur la machine sont plus complexes et imposent plus de déplacements aux différents organes. Il n'est pas prouvé qu'un tel équipement soit indiqué pour tous les tours semi-automatiques et il faut bien évaluer les avantages et les inconvénients qui s'attachent à son adoption. Pour l'instant encore, le prix des commandes numériques conduit beaucoup d'utilisateurs à préférer provisoirement les systèmes à fiches, d'un coût moindre et dont l'emploi leur paraît plus simple que les dispositifs à commandes numériques, pour lesquels une initiation différente des habitudes courantes est évidemment indispensable.

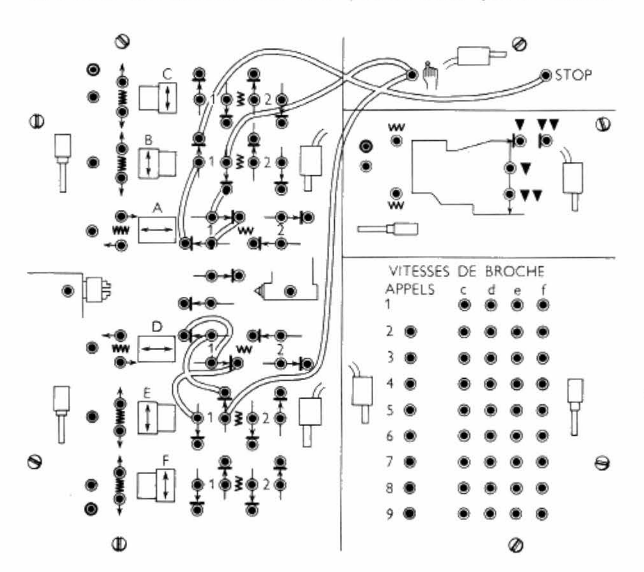


Fig. III-13 — Panneau électrique de programmation (*Salomé*)

2.3. Tours automatiques.

— Il convient de bien séparer le cas des tours monobroche et celui des tours multibroche.

2.3.1. Tours monobroches.

— Ils sont parfois appelés tours automatiques à décolleter. Leur origine date des années 1870 ; après la réalisation par l'Américain Parkhurst d'un dispositif pratique de serrage et d'avance de la barre, on arrive à l'époque où, aux États-Unis d'Amérique, Gridley, puis Brown et Sharpe devaient créer un certain nombre de modèles de tours automatiques. En Suisse, Bechler, Tornos,

Petermann ont développé leurs modèles au fur et à mesure de l'extension de l'industrie horlogère. En France les firmes Ernault, Cuttat, Bechet, Manurhin ont également apporté leur contribution à cette technique.

Le tour automatique est soumis aux règles qu'on appelle *programme et commande-programme*. Le programme est l'ensemble des données qui définissent le comportement automatique imposé au tour et la commande-programme est l'ensemble des moyens permettant à la machine d'enregistrer le programme et de s'y conformer. La commande par cames est, pour l'instant, la solution la plus répandue de commande-programme, mais il est bien évident que d'autres solutions sont possibles, telles que les circuits électriques à relais de commandes dont les améliorations successives conduisent à la commande numérique. Cependant, il semble que les grandes séries seront pour longtemps encore réalisées avec des cames.

On distingue parmi les tours automatiques monobroche :

— Les tours à poupée mobile.
— Les tours à poupée fixe.
— Les tours à arbre auxiliaire et tourelle revolver.

Les tours munis de tourelles peuvent rentrer dans les catégories suivantes :

- Les tours à tourelle cylindrique et à axe longitudinal.
- Les tours à tourelle cylindrique à double action (longitudinale et transversale).
- Les tours à tourelle polygonale à axe longitudinal (commande par came ou commande électromécanique par tambour-programme à taquets).
- Les tours à tourelle revolver à axe vertical (commande par tableaux à fiches) (V. § 2.2.1).

Tous les tours usinant une barre doivent utiliser des pinces de serrage ayant une action efficace. Le serrage est fait de plusieurs manières : serrage sur cône avant par tube de serrage conique, serrage sur portée sphérique, etc.

On va examiner maintenant ces différents modèles de tours.

1° *Les tours monobroches à poupée mobile.* — La poupée portant la broche peut coulisser longitudinalement sur le banc en entraînant avec elle la barre à décolleter qui est serrée par la pince. Les outils transversaux sont montés sur un support solidaire du bâti ; ils ne peuvent être déplacés que transversalement. La barre, qui traverse le support d'outil par un alésage muni d'un canon de guidage, est parfaitement centrée et guidée par ce canon et la pince de serrage ; les outils transversaux peuvent donc travailler avec toute la précision nécessaire. C'est pourquoi ce dispositif s'impose lorsque l'on doit usiner des barres de petits diamètres et de grandes longueurs telles que les pièces utilisées en horlogerie (d'où la vogue de ces tours en Suisse).

En général la poupée est une pièce en fonte munie de guides prismatiques qui permettent son guidage sur les glissières du banc. La broche est en acier dur trempé, parfois nitruré ; elle est soutenue par deux paliers permettant de grandes fréquences de rotation pouvant atteindre 10 000 tours par minute. Souvent le palier arrière est monté sur roulements et le palier avant sur coussinets en bronze avec rattrapage de jeu.

La poulie d'entraînement se trouve entre les deux paliers pour réduire au minimum les effets des efforts transversaux (fig. III-14).

Le support de l'outil, en fonte, est monté transversalement sur le banc ; il porte le canon de guidage et les outils transversaux. Le canon de guidage est une pièce creuse dont l'alésage a un diamètre très voisin de celui de la barre ; il est parfois réglable et se compose alors d'une bague fendue qu'un écrou adapte au diamètre de la barre. On peut le rendre tournant en le montant sur des butées à billes et en l'entraînant par le nez de la broche.

Les outils transversaux, appelés parfois burins (fig. III-15), sont solidement maintenus dans les porte-outils et répartis en étoile autour du canon. Les porte-outils extrêmes sont solidaires et sont montés sur une pièce appelée bascule qui les amène au contact de la barre ; lorsque l'un d'eux avance, l'autre recule. Les autres outils sont actionnés d'une manière indépendante par leurs cames et leurs leviers. Quant aux outils en bout, ils sont montés sur un socle en fonte fixé sur un support oscillant, lui-même placé sur le socle ; ils permettent de présenter successivement les outils dans la direction de l'axe de la broche. On peut monter trois porte-outils et disposer de plusieurs dispositifs en bout susceptibles de s'adapter sur le socle. En général, le basculement

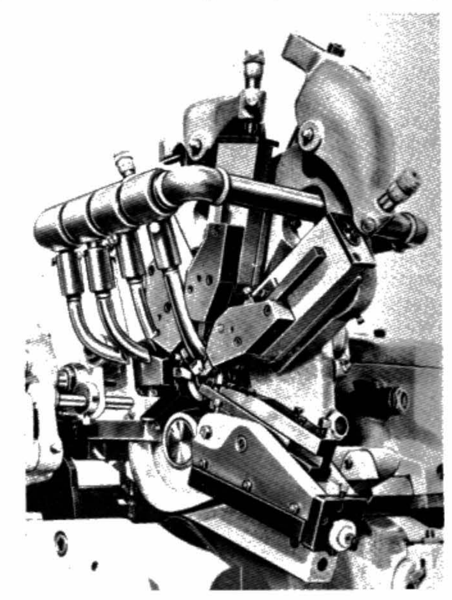


Fig. III-15

Tour automatique monobroche à poupée mobile ; outils transversaux (*F. Leblanc — Bêchet*)

Fig. III-14

Tour monobroche à poupée mobile (*F. Leblanc — Bêchet*)

est obtenu par une came plate et l'avance des outils par une came cloche.

Parfois, pour disposer d'un nombre plus grand d'outils en bout, on remplace le dispositif indiqué ci-dessus par une tourelle revolver à axe horizontal et de forme cylindrique. On arrive ainsi à disposer de six porte-outils. L'arbre à cames est placé à l'arrière de la machine ; il porte toutes les cames qui sont, en général, au nombre de six (ou même sept si l'on a cinq outils transversaux) avec, en plus, une came bec qui commande la broche tournante de filetage.

Grâce à ces cames, on obtient le fonctionnement suivant :

a) Ouverture et fermeture de la pince de serrage avec, entre temps, l'avance de la barre, came plate.

b) Mouvement de la poupée, came plate.

c) Mouvement des outils transversaux, came plate.

d) Mouvement de bascule de l'appareil en bout, came plate.

e) Avance et recul des outils en bout, came cloche.

Pour conduire un tour automatique, il faut, en plus des cames d'ouverture et de fermeture des pinces de serrage (qui restent les mêmes quelles que soient les opérations) calculer les 6 ou 7 cames dont le profil dépend de la pièce à usiner. Ce calcul n'est pas très difficile, il suffit d'avoir un peu de pratique du décolletage et de définir aussi exactement que possible les opérations à exécuter. Il convient donc d'établir un plan de travail qui comprend essentiellement :

— L'étude de la suite des opérations.

— Le choix des outils et des porte-outils.

— Le choix des vitesses de coupe en fonction de la matière à usiner et de l'opération à exécuter.

— La détermination de la fréquence de rotation de la broche suivant la vitesse de coupe correspondant au cas le plus défavorable et surtout le diamètre de la barre à usiner.

— Le choix des avances par tour pour chaque opération.

— Le choix des levées de cames, c'est-à-dire des hauteurs correspondant à chaque opération, en fonction de la course de l'outil et du rapport entre cette course et le déplacement du bec de commande.

— La détermination du nombre de tours de broche pour chaque opération productive.

— L'évaluation des temps improductifs et des temps nécessaires au dégagement des outils. Ce sont des constantes dépendant du tour et que l'on connaît d'avance.

Les temps improductifs, comme les temps productifs, sont évalués en fonctions de la circonférence de la came. On prend toujours comme origine l'instant où la barre vient d'être tronçonnée.

Les cames se présentent sous forme de solides ayant des profils qui se raccordent les uns aux autres et qu'on appelle *lobes*. Ces profils sont calculés de manière à bien respecter les moments où certains travaux, ou bien certains déplacements, doivent être exécutés simultanément ou non.

2° *Les tours automatiques monobroches à poupée fixe.* — Les tours à poupée mobile conviennent surtout aux pièces longues par rapport à leur diamètre. Lorsqu'il s'agit d'usiner des pièces courtes, il n'est pas nécessaire de rendre la poupée mobile ; c'est pourquoi on a mis au point des tours à poupée fixe dans lesquels les outils transversaux travaillent en plongée, l'un des outils étant réservé au tronçonnage. Les appareils en bout permettent aussi de travailler « en l'air », à condition de disposer d'un chariot de déplacement longitudinal. De plus, pour l'exécution de certains profils on dispose de chariots transversaux à coulisses croisées superposées dont l'une est commandée par une came spéciale. Cependant, assez souvent, le même résultat peut être obtenu à l'aide d'un reproducteur.

Les tours à poupée fixe simples sont dits « à vis » et comportent peu d'outils ; ceux qui comportent beaucoup d'outils permettent, en général, d'éviter toute opération de reprise, même si les pièces ont des formes compliquées.

Dans ces tours, l'avance de la barre est obtenue par une pince et un tube d'avance, commandés par des cames et des leviers ou bien par un contrepoids ; ce dernier dispositif permet d'augmenter la capacité d'usinage du tour d'une manière assez notable.

La détermination des cames et, par conséquent, le plan de travail qu'il s'agit d'établir, sont assez analogues à ceux que l'on établit dans le cas des tours à poupée mobile. On peut, cependant, noter quelques légères différences qui vont plutôt dans le sens de la simplification. Tout d'abord, les opérations relatives aux outils transversaux et aux outils en bout peuvent être considérées comme simultanées. Par exemple, s'il s'agit d'effectuer un perçage profond nécessitant un grand nombre de tours de broche, l'opération peut être exécutée simultanément avec celle des outils transversaux. De plus, il est assez facile d'utiliser des outils de forme dans certaines opérations de plongée ; ii en résulte une simplification dans le profil des cames et dans le réglage des outils mais la fabrication des outils de forme est plus délicate que celle des outils normaux.

3° *Les tours automatiques monobroches à arbre auxiliaire* (fig. III-16) *et à tourelle revolver.* — Dans ces tours on a cherché surtout à diminuer les temps improductifs. On aurait pu penser à les réduire en adjoignant un mécanisme d'accélération permettant à l'arbre à cames de tourner plus vite lorsqu'il s'agit de mouvements improductifs, mais cette solution n'est pas bonne car tout l'arbre

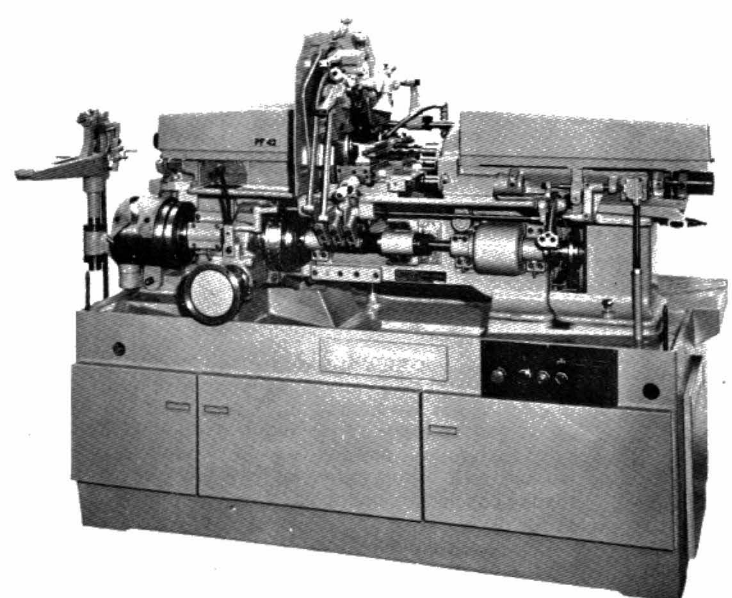


Fig. III-16

Tour automatique monobroche à arbre à cames auxiliaire (*Manurhin*)

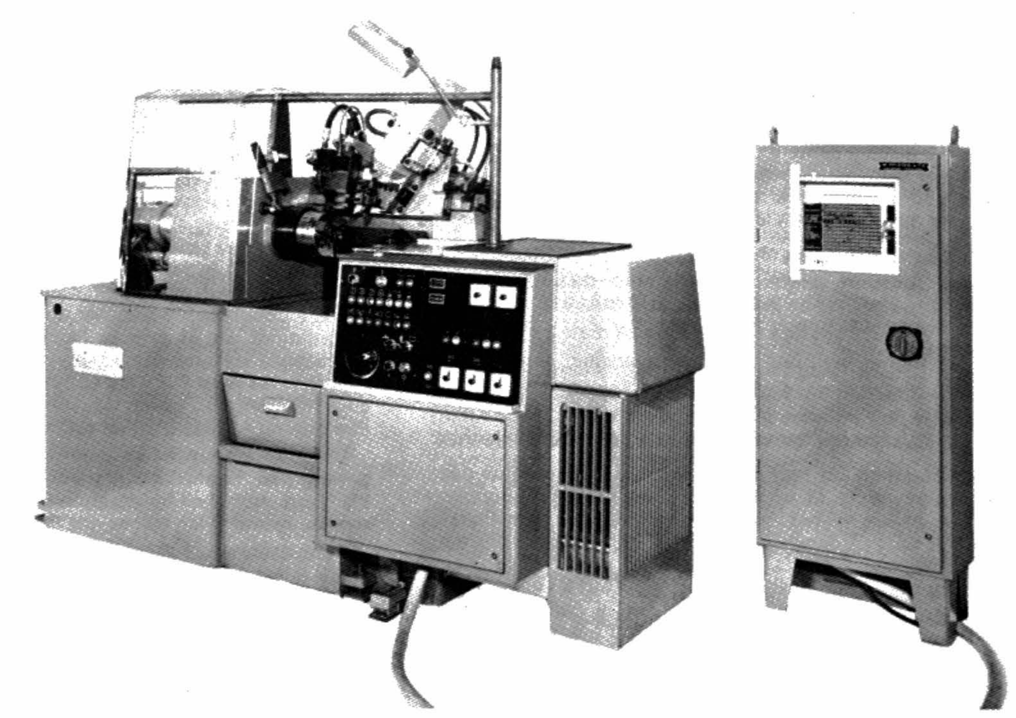


Fig. III-17

Tour muni d'une tourelle cylindrique (*Manurhin*)

à cames est entraîné, ce qui crée des moments d'inertie inutiles. Pour éviter cet inconvénient, on utilise un arbre à cames auxiliaire pour commander les mouvements improductifs : avance et serrage de la barre, changement de marche, rotation de la tourelle ; chacun de ces mouvements est commandé individuellement par accouplement direct. De plus, l'arbre auxiliaire entraîne l'arbre direct par un jeu d'engrenages, de telle sorte que la synchronisation est complète. En fait, c'est l'arbre auxiliaire qui constitue le mécanisme d'accélération. Pour réduire encore les temps morts, on utilise une tourelle à axe horizontal perpendiculaire au mouvement longitudinal. Les tours Brown et Sharpe, Index, Manurhin (V. fig. III-16), entre autres, fonctionnent selon ces principes. L'adaptation de ces perfectionnements a eu des répercussions sur la construction même des tours dont les outils sont devenus plus accessibles et l'évacuation des copeaux mieux assurée ; les bras de leviers entre cames et chariots ont eu leur rapport amélioré, le nombre de chariots a pu être augmenté, etc. Une autre amélioration a consisté à munir l'arbre auxiliaire d'un dispositif d'accélération spécial pour entraîner l'arbre principal. Les avantages d'un tel dispositif se précisent lorsque l'on veut utiliser un même jeu de cames, pour des pièces différentes car on peut éviter la baisse de rendement due au fait que les avances sont trop faibles ou que des opérations doivent être supprimées (avec comme conséquence regrettable que l'arbre tourne à vide pendant une partie du travail).

Dans ce dispositif, comme pour les modèles précédents, les cames sont calculées par les mêmes procédés, mais la complication est plus grande, car les organes utilisés sont eux-mêmes plus nombreux et plus complexes. On a essayé de supprimer les cames et de les remplacer par des dispositifs plus simples et plus rentables, surtout pour des séries petites et pour l'usinage de pièces assez grandes compte tenu de ce qu'il s'agit de décolletage. La suppression totale des cames n'est pas nécessaire et, parfois, on les remplace en partie par des cames dites universelles, réglables. Mais les tours les plus modernes utilisent, comme on l'a déjà indiqué, des circuits à relais commandés par des tableaux à fiches.

4° *Les tours munis de tourelles.* — L'emploi de tourelles cylindriques présente un très grand intérêt car il est possible de monter sur elles beaucoup plus d'outils que sur les autres. Lorsque l'axe de ces tourelles est longitudinal, l'encombrement transversal est notablement réduit ; de plus, la rotation de la tourelle permet d'exécuter facilement certains usinages transversaux. La combinaison des deux possibilités permet aussi d'exécuter des travaux par reproduction. Les tours Cleveland, Pittler, Manurhin (Decomat) répondent à cette description.

La commande de ces tours peut être mécanique (par cames comme pour des modèles Cleveland), mais il y a intérêt à utiliser des commandes d'avance électroniques ; à cet effet, on utilise des potentiomètres de réglage d'avance ou des tableaux à fiches de contact (Pittler).

Il convient de signaler plus spécialement le tour Manhurin Decomat (Procédé Kirchhoffer) dans lequel la tourelle, cylindrique ou octogonale (fig. III-17) est à double action,

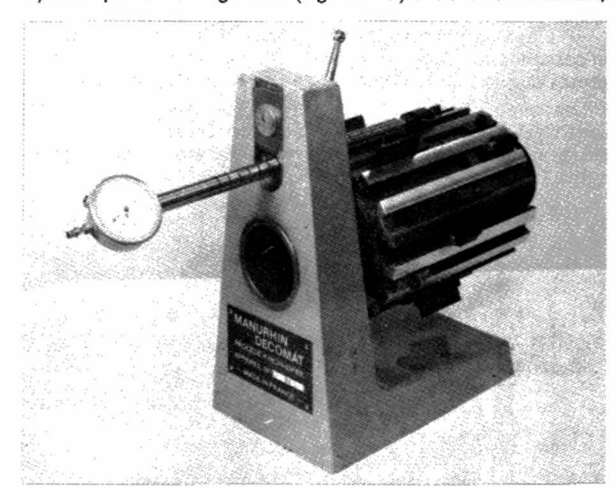


Fig. III-18 — Appareil de préréglage d'un barillet porte-butées (*Manurhin*)

longitudinale et transversale, et permet ainsi le travail en reproduction. La tourelle et le tambour porte-butées destinés à limiter les courses sont amovibles de telle sorte qu'on peut préparer l'équipement d'un jeu de tourelles et de tambours non monté sur le tour, pendant qu'un autre jeu de tourelles et de tambours fonctionne, ce qui permet de réduire considérablement les temps improductifs (fig. III-18 et III-19).

Lorsque la tourelle à axe longitudinal est polygonale, le tour peut être utilisé pour le décolletage de barres ayant un diamètre de 100 à 150 mm et pour les travaux en man-

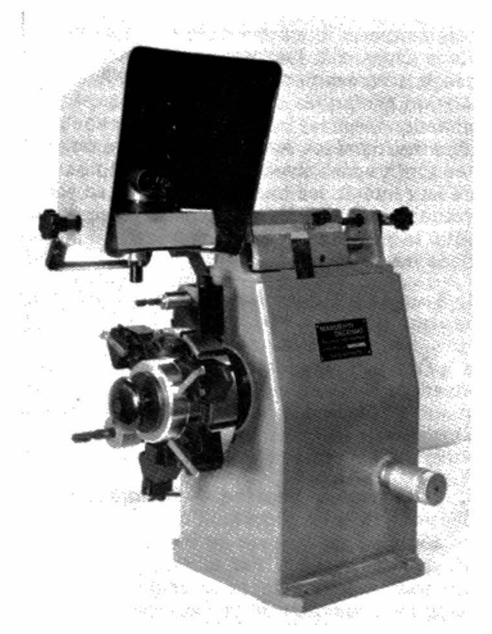


Fig. III-19 — Appareil de préréglage d'une tourelle (*Manurhin*)

drin. Deux possibilités s'offrent pour le fonctionnement de ces tours : ou bien chaque face de la tourelle comporte une coulisse longitudinale sur laquelle sont montés les outils, chaque coulisse pouvant recevoir individuellement son mouvement d'avance, ou bien toute la tourelle reçoit le mouvement d'avance sans discrimination. Suivant les modèles, la commande-programme est mécanique (Gridley), électromécanique (Acmé Gridley) ou à tambour à taquets (Warner et Swasey).

L'adaptation aux tours automatiques de tourelles à axe vertical est de date assez récente ; cette solution a été pendant longtemps réservée aux tours semi-automatiques où le chariot porte-tourelle était manœuvré par cabestan, ainsi qu'on l'a indiqué plus haut. Les ressources actuelles de l'automatisation permettent désormais l'emploi de ces tourelles d'une manière courante : en effet, la fixation des outils et leur combinaison sont, dans beaucoup de cas, plus facilement réalisables sur ces modèles. Il n'est pas étonnant que ce soient les constructeurs pour lesquels les tours semi-automatiques représentent les fabrications essentielles qui aient adopté les tourelles polygonales pour leurs modèles de tours automatiques ; c'est le cas du tour Ernault-Somua (fig. III-20).

2.3.2. Tours multibroches. — Ces tours présentent la propriété de pouvoir usiner en même temps plusieurs barres qui se présentent successivement devant chaque groupe d'outils. La rapidité de l'usinage à réaliser, l'évacuation des copeaux, l'obligation de préparer à l'avance des outillages que l'on ne peut plus modifier une fois qu'ils sont en fonctionnement, font de ces machines des moyens de production particulièrement puissants, d'un très grand rendement, adaptés aux très grandes séries. En revanche, leur fonctionnement est coûteux et la préparation du travail, y compris celle des outillages nécessaires, entraîne des frais qui doivent être répartis sur des fabrications très longues de pièces identiques. De plus, il peut arriver que les pièces ainsi fabriquées doivent recevoir un usinage complémentaire sur des machines dites de reprise. Dans les ateliers, l'emploi des tours multibroche doit donc être soigneusement étudié, avant tout achat, pour éviter de graves erreurs financières.

Les tours multibroches sont, en général, à arbre principal et à cames tambours. Ils comprennent une poupée constituée par un barillet porte-broches (fig. III-21) à travers lequel passent les broches, une contre-poupée ou un chariot longitudinal (tourelle), des porte-outils à autant de postes qu'il y a de broches, des chariots transversaux, un arbre principal à cames tambours qui commande les différents mouvements automatiques.

Les mouvements qu'il faut réaliser sont les suivants :

— Rotation du barillet porte-broches d'une fraction de

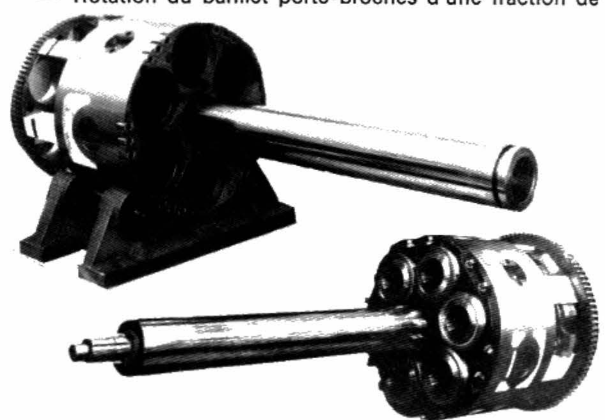
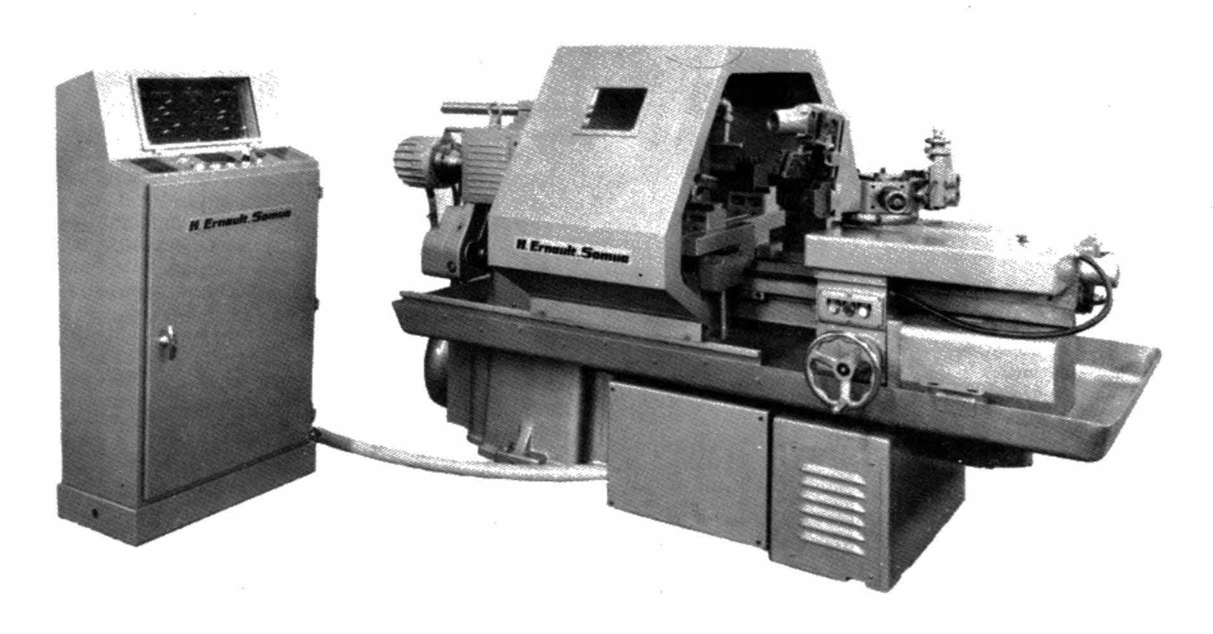


Fig. III-21 — Barillet d'un tour automatique à six broches (*AMTEC — France*)

Fig. III-20 — Tour automatique à tourelle polygonale à axe vertical (*Ernault — Somua*)



tour correspondant au nombre de broches. On appelle assez souvent cette opération « nombrage ».

— Alimentation comprenant l'ouverture de la pièce, l'avance de la barre, la fermeture de la pièce correspondant à la broche sur laquelle une pièce vient d'être tronçonnée.

— Avance et recul des chariots porte-outils, chariot longitudinal et chariots transversaux.

On retrouve ici, comme pour les tours monobroches, la nécessité de mouvements relativement lents pour le travail lui-même et de mouvements plus rapides pour réduire les temps improductifs (rotation du barillet, approche et recul des chariots) ; c'est à cette préoccupation que répond l'emploi du dispositif d'accélération. Suivant les cas, l'arbre principal s'étend tout le long de la machine, à sa partie inférieure ou à sa partie supérieure.

Les tours multibroches peuvent avoir quatre, cinq, six et même huit broches. Par ailleurs, lorsqu'il s'agit de travaux de décolletage, on peut utiliser des tours de petites dimensions (passages de barres inférieures à 20 mm, susceptibles de concurrencer les tours monobroche) ; on trouve aussi des machines ayant comme passage de barre 60 mm et entraînées par des moteurs atteignant 30 kW.

L'outillage comprend les outils courants à décolleter, mais, dans la mesure du possible, pour éviter des travaux sur des machines de reprise, on s'efforce d'adapter un certain nombre d'outils sur la tourelle ou en bout ; on peut ainsi fileter, tarauder, percer, aléser et même avec certains appareils, fraiser et effectuer des plongées angulaires.

2.3.3. Tours automatiques verticaux (fig. III-22). — Ce genre de machines est assez rare ; on peut citer cependant le tour Gyromatic de la firme suisse Tavannes Watch. De tels tours présentent les avantages suivants :

— L'évacuation des copeaux est facilitée.

— Les barres descendent sous l'action de leur propre poids, ce qui supprime l'emploi de pinces d'avances.

— Il n'y a aucun effort transversal sur le barillet porte-broche.

— Il y a une came de commande pour chaque outil, ce qui simplifie beaucoup le tracé et le réglage des cames.

Le tour comprend essentiellement :

— Un socle et 3 colonnes verticales disposées à 120°.

Ces colonnes portent le barillet, la contre-poupée et les chariots latéraux à raison de deux par colonne.

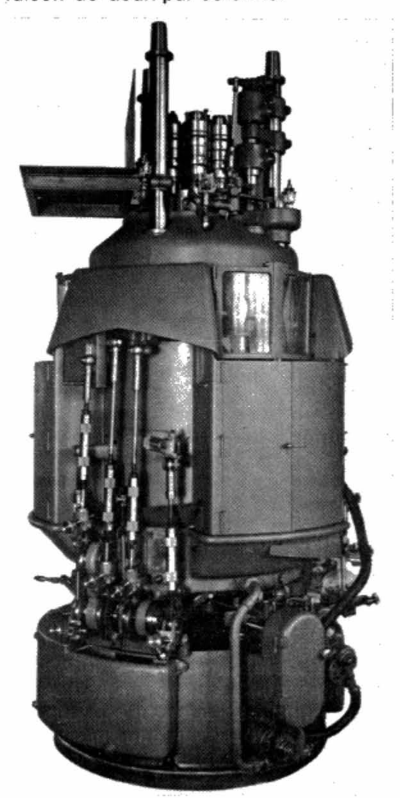


Fig. III-22

Tour vertical (*Tavannes — Watch*)

Le socle supporte le moteur et la commande principale, trois arbres chacun à l'aplomb d'une colonne, la boîte d'avances, la commande de rotation du barillet, le dispositif d'accélération et d'autres accessoires (arrosage, etc.).

Les opérations sont les mêmes que pour les autres tours et sont préparées dans les mêmes conditions, en particulier, les cames sont tracées suivant les mêmes règles.

Malgré leur intérêt, les tours verticaux ne se sont pas répandus autant qu'on aurait pu le penser. L'une des raisons semble être la difficulté de manipulation des barres pour les placer dans les porte-barres.

2.3.4. Tours multibroches à cames indépendantes et à course d'outils réglables. — Le réglage de la course des outils constitue un avantage considérable en ce sens qu'on peut utiliser un même jeu de cames pour des fabrications différant légèrement. Ce résultat est atteint en graduant la course des outils ; des arbres intermédiaires portent les cames universelles qui actionnent les chariots porte-outils par l'intermédiaire des coulisses réglables.

2.3.5. Le travail en reprise. — Malgré tous les efforts accomplis pour doter les tours multibroches d'un outillage à peu près complet, on ne peut se dispenser totalement de divers travaux de reprise. Par ailleurs, il arrive que l'on utilise un tour multibroche pour usiner des pièces déjà ébauchées ; l'alimentation de la machine est alors difficile car on est ramené à une forme de travail en mandrin. L'alimentation doit ainsi être réalisée à l'aide de magasins d'alimentation. Un des procédés consiste à utiliser l'un des chariots transversaux, par exemple le chariot avant ; un couloir d'alimentation ayant la forme d'un plan incliné laisse descendre les pièces par gravité et, grâce à un système variable suivant les constructeurs, une seule pièce passe, les autres pièces étant bloquées ; le couloir peut aussi être oscillant, c'est-à-dire être horizontal pour permettre le travail des outils puis redressé pour permettre la descente des pièces. Tous ces dispositifs doivent être étudiés en fonction de la forme et du poids des pièces en utilisant, notamment, tous les éléments de dissymétrie permettant de loger la pièce dans le couloir d'alimentation exactement à la place voulue.

2.3.6. La fabrication des cames. — Les cames à fabriquer sont, en général, plates ou en cloche. Les cames à tambours sont presque toujours livrées avec la machine. Pour les cames plates, on part d'une rondelle à trou central destiné au passage de l'arbre à cames et ayant les dimensions standard indiquées par les constructeurs ; on reproduit sur la came le tracé donné par le calcul, on en fait l'usinage, et ensuite, la trempe. Le tracé est effectué avec des machines spéciales. L'usinage est fait d'abord grossièrement à la lime ou par une série de trous. La finition est, en général, exécutée sur des machines à fraiser spéciales permettant de réaliser les courbes spirales nécessaires. Lorsque les cames présentent des points singuliers, comme les cames en cœur, l'usinage peut être très difficile ; l'emploi de l'électro-érosion paraît alors donner de très bons résultats. En raison de la longueur de l'usinage des cames, on a tenté d'utiliser des machines à commande numérique qui permettent, en principe, d'usiner n'importe quel profil. Les essais de plusieurs constructeurs semblent avoir donné satisfaction mais la doctrine n'est pas encore très ferme sur ce point.

En résumé, les tours automatiques semblent devoir conserver leur intérêt pendant longtemps encore, même si certaines formules de tours semi-automatiques constituent pour eux une concurrence parfois redoutable. Pour l'industrie horlogère, la boulonnerie et la visserie et, d'une manière générale, pour les produits de très grande série, il ne paraît pas probable qu'une concurrence très sérieuse puisse apparaître, même si les produits moulés ou roulés présentent parfois de l'intérêt. En revanche, la question qui pourra se poser sera l'introduction de la commande numérique qui, sur certains points et à condition que les séries ne soient pas trop grandes, est susceptible d'apporter des solutions nouvelles.

2.4. Tours verticaux. — Les tours verticaux représentent une solution très intéressante d'usinage pour des pièces assez lourdes et encombrantes qu'il serait

malaisé d'installer sur des tours à axe horizontal. La formule des tours dits « en l'air » qui consiste en tours parallèles travaillant sur plateau et sans contre-poupées, avec un banc laissant près de la poupée un passage qu'on appelle un « banc rompu », ne peut pas convenir aussitôt que les pièces à tourner ont un diamètre très grand et un poids important. L'emploi du tour vertical répond, au contraire, à ces besoins.

Un tour vertical se compose d'un bâti portant un plateau tournant autour d'un axe vertical passant par le centre du bâti. Sur les côtés du bâti se trouvent soit un (fig. III-23), soit deux montants (fig. III-24) verticaux portant une traverse horizontale. L'emploi d'un seul montant a l'avantage de permettre l'installation sur le plateau de pièces très encombrantes; mais le montant qui est soutenu d'un seul côté subit un porte-à-faux qui peut contrarier certaines opérations. Pour augmenter les possibilités de la machine, on peut placer sur la traverse un ou plusieurs chariots porte-outils, mais les porte-outils les plus utilisés sont placés sur le montant. Les chariots porte-outils ont des commandes indépendantes, ce qui permet de les faire travailler à volonté simultanément ou successivement; il en résulte que le rendement est nettement augmenté, surtout pour l'usinage de pièces de grandes dimensions, ayant des formes variées. Le plateau est guidé par des glissières plates ou en V ; le mouvement de rotation est obtenu par l'intermédiaire d'une couronne à denture intérieure et d'un engrenage recevant le mouvement de la boîte de vitesses par un couple conique si les glissières sont plates, ou par un couple couronne-engrenage conique si les glissières sont en V.

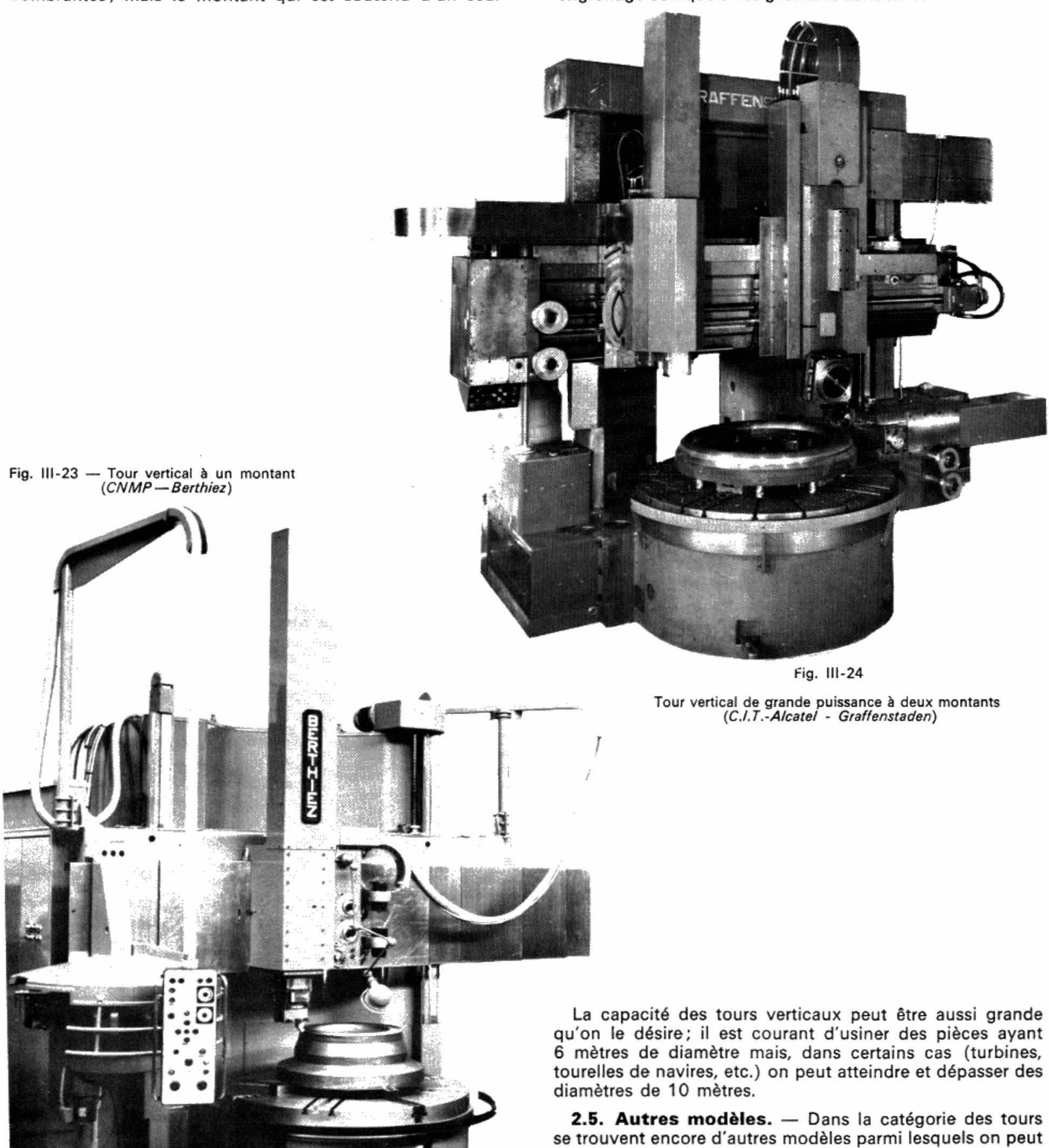


Fig. III-23 — Tour vertical à un montant (*CNMP — Berthiez*)

Fig. III-24

Tour vertical de grande puissance à deux montants (*C.I.T.-Alcatel - Graffenstaden*)

La capacité des tours verticaux peut être aussi grande qu'on le désire; il est courant d'usiner des pièces ayant 6 mètres de diamètre mais, dans certains cas (turbines, tourelles de navires, etc.) on peut atteindre et dépasser des diamètres de 10 mètres.

2.5. Autres modèles. — Dans la catégorie des tours se trouvent encore d'autres modèles parmi lesquels on peut citer les tours à détalonner qui ont pour objet d'usiner suivant une spirale d'Archimède la face de dépouille des dents de fraises et de certains outils. Ils sont caractérisés par le fait que le chariot transversal possède une avance lente

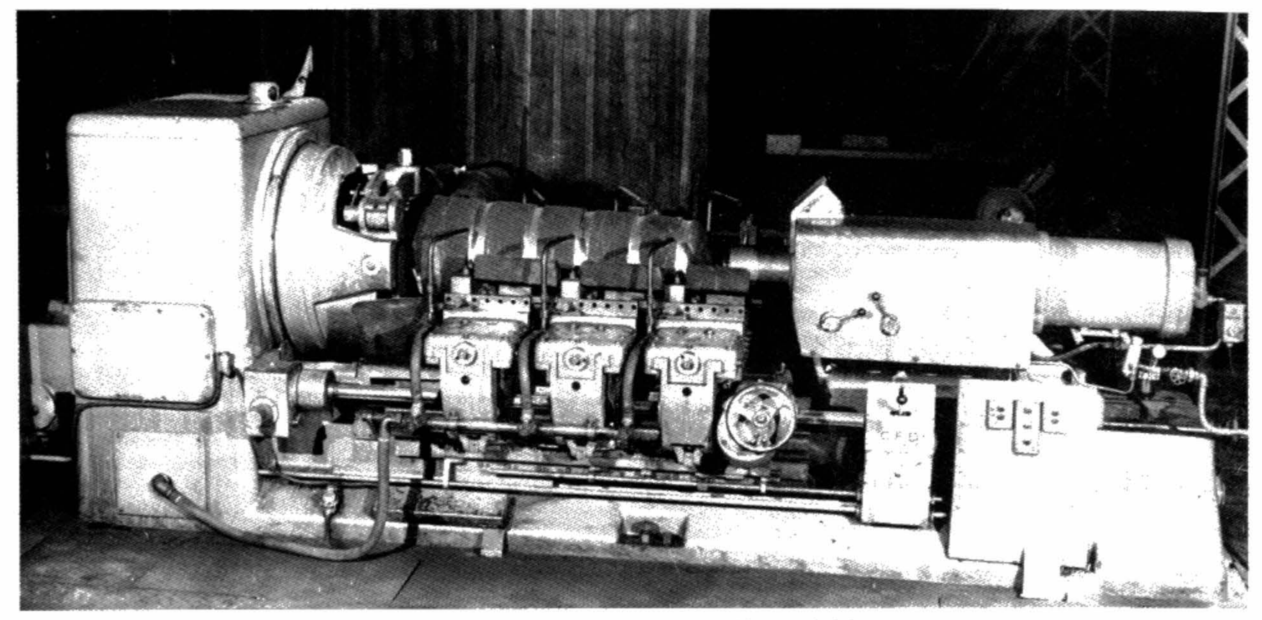


Fig. III-25 — Tour à écroûter les lingots (*Creusot-Loire*)

pour exécuter le travail et un retour rapide dès que l'outil a terminé son usinage; ce mouvement de va-et-vient est la caractéristique du tour à détalonner. On dit qu'il est simple quand le chariot transversal n'a pas de mouvement longitudinal et universel dans le cas contraire, car il peut alors détalonner tous les outils à denture droite ou hélicoïdale.

D'autres tours sont affectés à des travaux spéciaux; c'est le cas des tours à écroûter les barres ou les lingots; les tours à écroûter les barres n'ont pas de pointes, la barre est serrée en deux points par deux chariots qui se déplacent sur des guides cylindriques et passent à travers deux têtes porte-outils, un pour l'ébauche, l'autre pour la finition; à la fin du travail, le chariot de gauche se désengage, revient en arrière et la barre est serrée dans l'étau qu'il porte puis déplacée vers la droite suivant un cycle permanent. Les tours à écroûter les lingots (fig. III-25), c'est-à-dire des pièces non cylindriques, sont munis d'un dispositif permettant de réaliser le profil exact demandé.

Les tours pour ateliers de chemins de fer servent à usiner les bandages de roues, les essieux, etc.; il s'agit là d'applications particulières.

3. LES MACHINES À FILETER À GRAND RENDEMENT

Ces machines s'apparentent aux tours à fileter mais sont équipées selon un système différent qui consiste à utiliser des cames au lieu de vis mères; on atteint ainsi une vitesse de filetage beaucoup plus grande que par les procédés habituels et, de plus, l'adaptation de la machine à des filetages différents est obtenu avec une très grande rapidité. De plus, la forme de la machine, qui s'apparente à celle des tours, permet d'exécuter à peu près tous les travaux de tournage et, au moyen de reproducteur, de réaliser des pièces de révolution aussi bien que sur les tours semi-automatiques. Le principe du filetage, réalisé par la firme Cri-Dan en France est le suivant (fig. III-26): la broche de la machine est reliée à l'arbre cannelé de commande des mécanismes de filetage pour permettre un premier travail au moyen de pignons interchangeables destiné à préparer l'exécution des filetages: inversion du sens de rotation pour filetages à gauche, variation de la vitesse de rotation pour augmenter la gamme des rapports possibles, etc.

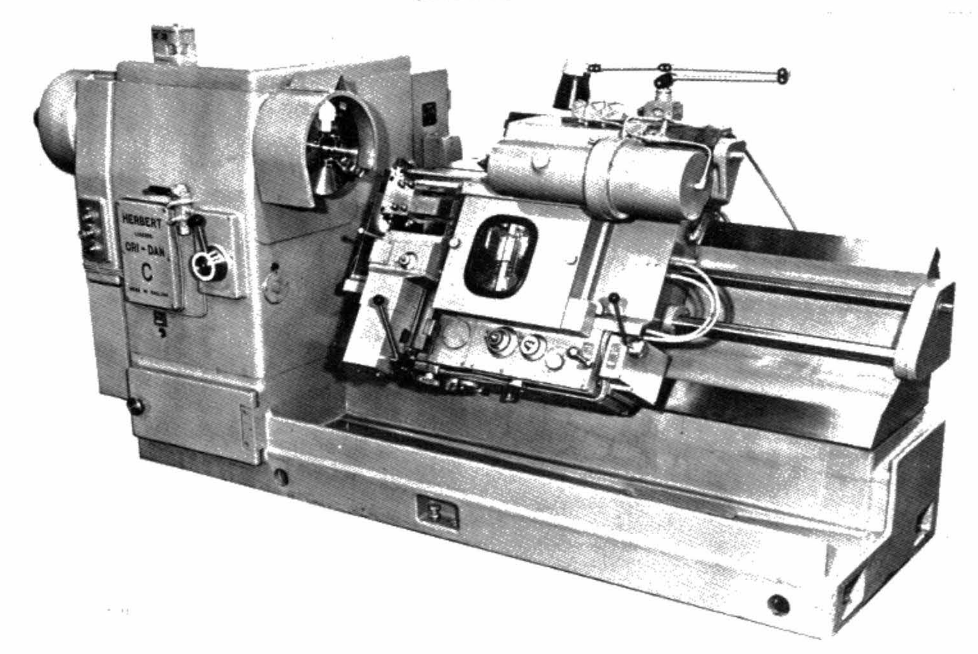


Fig. III-26

Machine pour filetage rapide (*Cri-Dan*)

Un embrayage à crabots, commandé manuellement ou automatiquement, embraie ou débraie le mécanisme de filetage en assurant la retombée automatique de l'outil dans le pas. En utilisant un porte-outil indexable, on peut exécuter les filetages délicats et précis en deux opérations successives : la première avec un outil d'ébauche, la deuxième avec un outil de finition (son usure est très faible puisqu'il est réservé à des passes finales).

Le traînard est constitué par un caisson qui supporte les chariots de filetage et contient leurs mécanismes de commande ; il ne se déplace sur le banc que pour mettre en place l'outil au moment du début du filetage. Il est bloqué dans cette position pour que seuls les chariots longitudinal et transversal soient en mouvement pendant l'exécution des filetages. De cette manière, le traînard joue le rôle d'un banc intermédiaire auquel on peut donner toute la résistance nécessaire et les chariots peuvent avoir la légèreté indispensable à l'exécution des mouvements rapides qu'impose l'usinage. Pour faciliter leurs déplacements, ils coulissent sur des chemins de roulement à aiguilles préchargées.

Le mécanisme du filetage peut être exposé ainsi qu'il suit (fig. III-27) : un arbre cannelé établit la liaison entre la poupée fixe et le traînard qu'il traverse pour transmettre son mouvement à l'arbre porte-cames au bout duquel est montée la came de pas ou came-mère. Cette came joue

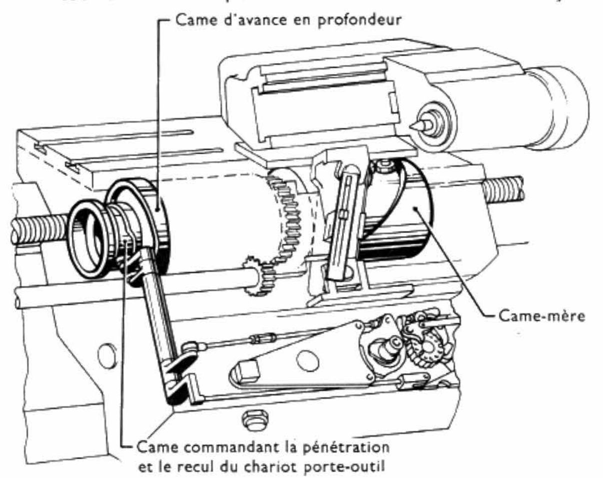


Fig. III-27 — Schéma d'une machine pour filetage rapide (*Cri-Dan*)

exactement le rôle qu'ont les vis mères sur les tours parallèles. La rotation de la came, prise entre deux galets solidaires du chariot longitudinal, commande le mouvement alternatif de ce dernier ; le filet est engendré pour une rotation de 270° et le retour rapide est assuré par une rotation de 90°. Par conséquent, un tour de 360° de la came de pas détermine le cycle complet d'une passe ; pendant ce temps, le chariot transversal reçoit un double mouvement :

— Un déplacement automatique, d'amplitude fixe, dégage l'outil de la pièce immédiatement à la fin du travail et permet le retour rapide et l'engagement pour une nouvelle passe ;

— Un déplacement automatique, réglable en fonction de la profondeur du filet qui s'ajoute au précédent ; il est soit constant, soit décroissant suivant les conditions de travail choisies.

La dernière passe terminée, la broche est freinée et les mécanismes sont débrayés. Ils reviennent automatiquement à leur position de départ pour entamer le cycle suivant.

Avec des outils à grande vitesse de coupe, la durée d'une passe n'excède pas une seconde, ce qui ne peut pas être obtenu par les procédés de filetage à la vis mère. Il est bien évident que seuls des filetages de petites et moyennes longueurs peuvent être usinés par ce procédé, mais les machines Cri-Dan peuvent très facilement utiliser des vis mères pour des filetages de grandes longueurs.

Par des dispositifs ingénieux, les éléments utilisés pour le filetage peuvent servir également pour des travaux de tour, notamment par reproduction, de sorte que ces machines constituent, en fait, de véritables tours semi-automatiques. L'intérêt de cette extension est évident car le filetage ne représente qu'une partie réduite de l'activité de l'usinage sur machines-outils.

Certains constructeurs, tels que Ramo en France, montent sur leurs tours parallèles des dispositifs de filetage rapide, qui ne nécessitent pas l'emploi d'une machine spéciale. Les principes de tels dispositifs, tout en différant de ceux exposés ci-dessus, présentent avec eux des analogies intéressantes.

4. LES RABOTEUSES (fig. III-28)

Ce type de machines est très ancien et a, pendant longtemps, servi pour des travaux qui sont actuellement exécutés sur des fraiseuses ; cependant les machines de grandes capacités ont continué à être très utilisées à titre, soit de raboteuses, soit de raboteuses-fraiseuses, auquel cas il est possible d'allier les propriétés des deux machines. De plus, les améliorations incessantes apportées aux modèles existants en ont augmenté le rendement et surtout la précision. On doit considérer actuellement qu'une raboteuse est faite pour réaliser des usinages très précis, à 0,01 mm près, d'une manière à peu près courante. Il est d'ailleurs nécessaire d'obtenir cette précision pour l'exécution de pièces qui ont, en général, une longueur assez grande et qui sont à la base



Fig. III-28

Raboteuse à deux montants (*Liné — G.S.P.*)

de la qualité d'une machine. Les bancs des machines-outils en sont l'exemple le plus courant.

L'étude des précautions prises pour obtenir cette précision indispensable apparaîtra plus nettement dans la description de ses différents organes. On peut toutefois mentionner dès à présent que les causes d'erreurs les plus grandes sont dues au porte-à-faux de la table et à la nécessité d'arrêter celle-ci en un temps extrêmement court au point qui a été choisi pour cet arrêt, sans que l'entraînement, l'inertie ou toute autre raison soient la cause d'une insuffisance de précision.

En simplifiant la définition, le travail de la raboteuse est l'usinage des faces planes. À cet effet, la machine se compose d'un bâti large et solide portant des glissières droites planes ou en V (V. fig. III-28). Sur ces glissières peut coulisser une table qui porte la pièce à usiner; en général, la course de cette table est telle que ses extrémités dépassent le bâti, lorsqu'elle arrive en fin de course et cela des deux côtés du bâti. Ce dépassement ne doit pas être trop grand pour éviter un porte-à-faux qui pourrait entraîner une inclinaison vers le bas excessive de la table et de la pièce qu'elle supporte.

Le coulissement de la table sur le bâti doit faire l'objet des plus grands soins. À cet effet, les glissières peuvent être prises dans la masse ou bien être rapportées, auquel cas elles sont en acier trempé, alors que le bâti peut être en fonte. Parfois, on rapporte sur les glissières un revêtement en matière plastique pour en accroître la durée. En ce qui concerne la lubrification, elle doit tendre à substituer un contact par film d'huile à un contact métal sur métal; ce résultat est atteint au moyen d'un graissage sous pression. Ainsi on conserve un film d'huile d'épaisseur constante ce qui est nécessaire pour maintenir avec exactitude les distances entre les outils et la pièce et pour éviter un déchirement du film notamment dans le cas de changements de vitesses répétés (en anglais *stick slip*). Depuis quelque temps, des essais ont été effectués en vue de remplacer le film d'huile par un coussin d'air; cette technique, appliquée déjà à des réalisations dans des domaines différents, a été utilisée efficacement dans la construction de certaines machines-outils, notamment pour des paliers dits fluides. L'application à des glissières est de date beaucoup plus récente et n'a été essayée que sur quelques modèles. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants; ils doivent, évidemment, être confirmés par des essais pratiques plus importants, mais tout paraît déjà indiquer qu'il s'agit là d'une innovation heureuse.

L'entraînement des raboteuses pose certains problèmes particuliers dont les principaux sont: la possibilité de disposer de plusieurs vitesses et d'obtenir un changement de vitesse très rapide ainsi que la possibilité d'arrêter la table très exactement à une position repérée à l'avance. La masse de la table et des pièces qui sont fixées sur elle est très importante (plusieurs tonnes et même plusieurs dizaines de tonnes) et l'inertie de l'ensemble rend assez difficile la réalisation de ces deux conditions. Le dispositif de commande le plus couramment utilisé est le moteur à vitesses variables. Dans ce cas, le mouvement circulaire du moteur est transformé en mouvement rectiligne par pignons et crémaillères; les moteurs sont presque toujours accouplés directement au train d'engrenages de commande de la crémaillère. L'inversion de marche est obtenue par inversion du sens de rotation du moteur à moins que l'on dispose de deux moteurs, un pour chaque sens de marche. La gamme de vitesses peut varier dans la proportion de 1 à 10 grâce à l'application de principes analogues à celui de Ward-Léonard. Les puissances peuvent atteindre 100 kW et les vitesses 150 mètres par minute. Il n'est pas impossible que ces valeurs soient dépassées.

Grâce à ces dispositifs, on peut déterminer facilement une vitesse d'approche, une vitesse de travail et une vitesse de dégagement d'outils, mais, pour des pièces complexes, l'opérateur peut faire varier ces vitesses d'une manière notable en cours de travail.

En raison de l'inertie considérable développée pendant l'usinage, il est indispensable de prévoir des sécurités pour éviter que, en raison d'un incident quelconque, la table soit brusquement soulevée au-dessus de ses glissières et arrive même à se séparer de la machine.

Les deux montants, placés de part et d'autre du bâti (s'il n'y en a qu'un seul, celui-ci est placé en un point déterminé du bâti) portent des glissières verticales sur lesquelles coulisse une traverse. Une raboteuse porte, en général, quatre porte-outils, deux sur la traverse et un sur chaque montant. Ces porte-outils sont fixés sur des chariots coulissant sur les montants. Chaque chariot porte un centrage sur lequel est montée une tête tournante; grâce au coulissement et à la rotation de la tête, on peut régler la profondeur de coupe et l'inclinaison de l'outil dans le plan vertical. Sur les raboteuses modernes, chaque porte-outil est indépendant et l'on peut régler individuellement l'avance de chacun d'eux; ces avances varient, en général, de 0,2 à 30 mm et les déplacements des porte-outils pour leur mise en position, atteignent des vitesses de 2 à 3 mètres par minute.

Les outils eux-mêmes ressemblent à des outils de tour. Leur montage est tel que l'arête de coupe est légèrement en retrait par rapport au plan d'attaque du corps d'outil. Par ailleurs, il importe de prévoir un relèvement de l'arête pendant la course de retour; celle-ci est plus rapide que la course d'aller et dans ce trajet, l'arête ne pourrait manquer de subir des détériorations. En général, ce relevage est obtenu par moteur à freinage rapide ou par électro-aimant ou même mécaniquement et est synchronisé avec le mouvement de la table. Grâce au relevage automatique, on peut actuellement utiliser des outils plus robustes, munis de plaquettes de carbure; de cette manière on peut atteindre des vitesses de coupe de 60 à 80 mètres par minute pour de l'acier à 70 daN/mm² et pour le bronze, de 50 à 60 mètres par minute pour la fonte. Quant à l'avance, pour un planage en ébauche, on pourra atteindre plusieurs millimètres.

Pour éviter la perte de temps causée par le retour à vide, certains constructeurs ont réalisé des raboteuses avec des porte-outils, notamment ceux portés par la traverse, équipés de deux outils montés en opposition. De cette manière, l'un d'eux travaille toujours pendant que l'autre est relevé. Le gain de temps est très net (environ 40 %).

Les raboteuses peuvent également recevoir certains équipements spéciaux qui permettent leur emploi sous des formes variées. C'est ainsi qu'elles peuvent être équipées en fraiseuses comme on le verra plus loin. De plus, pour l'exécution de travaux spéciaux, on peut modifier assez notablement leur forme de travail. C'est ainsi, par exemple, qu'on arrive à laisser la pièce fixe et à déplacer les porte-outils; ce procédé est employé pour usiner des chanfreins et également les rails.

5. LES ÉTAUX-LIMEURS ET LES MORTAISEUSES

Les étaux-limeurs et les mortaiseuses sont des machines-outils qui, après avoir connu une très grande vogue, tendent à être délaissées, d'abord parce qu'elles ne permettent que des usinages limités, ensuite parce que les fraiseuses sont utilisables pour exécuter presque tous les travaux correspondants et qu'en particulier, il est facile de monter sur une fraiseuse un appareil à mortaiser. Toutefois, il existe encore des opérations pour lesquelles ces machines peuvent rendre des services intéressants.

L'étau-limeur est une raboteuse dans laquelle la pièce est fixe et l'outil mobile au bout d'un bras; les inerties sont moins importantes que pour les raboteuses, mais le porte-à-faux de l'outil en réduit la course à moins d'un mètre (fig. III-29). Le mouvement de l'outil est alternatif, il est obtenu à l'aide d'une bielle commandée par un plateau-manivelle qui porte une couronne dentée entraînée par la boîte de vitesses. En réglant la position de la bielle sur le plateau, on peut faire varier la course de l'outil; cette variation est également obtenue en ajustant la position de l'extrémité de la bielle sur le coulisseau. La table est placée sur deux glissières portées par le bâti et sur lesquelles elle peut se déplacer verticalement; deux glissières transversales permettent de lui donner un déplacement perpendiculaire à celui de l'outil. Celui-ci est muni, comme les outils de raboteuse, d'un dispositif de relevage. L'étau-limeur est parfois muni d'un dispositif permettant de modifier le déplacement de l'outil à la fois longitudinalement, transversalement et verticalement pour obtenir des pièces de

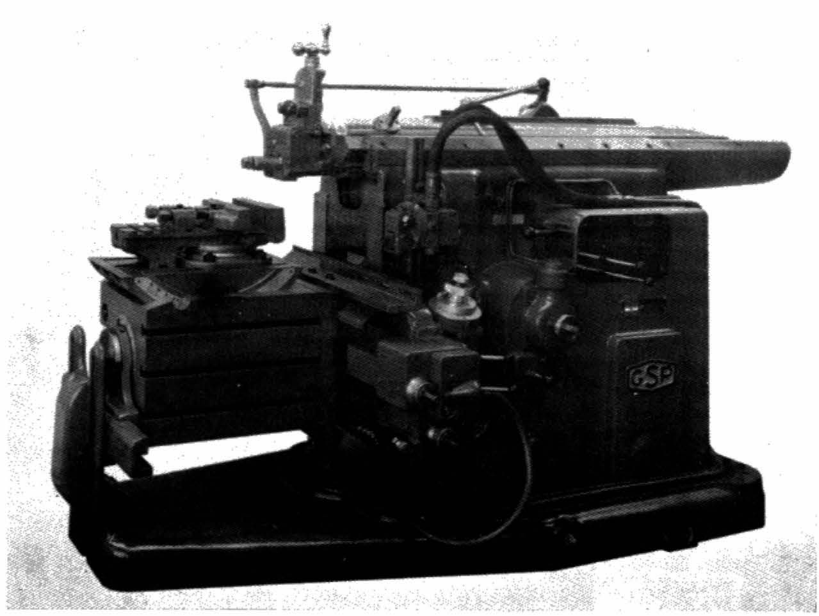




Fig. III-29 — Étau-limeur muni d'un dispositif de reproduction (*G.S.P.*)

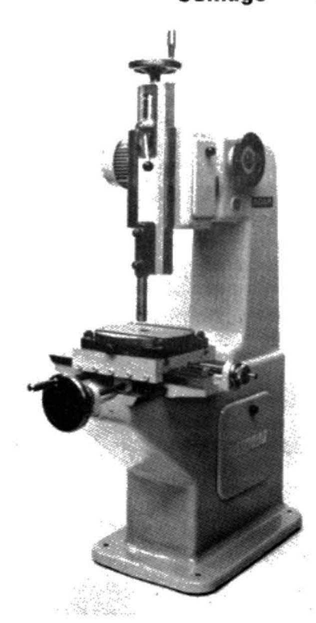


Fig. III-30 — Mortaiseuse (*Arsicaud et fils — Adam*)

formes complexes. Ces déplacements se font presque toujours à la main car il s'agit de travaux peu courants.

La mortaiseuse peut être considérée comme un étau-limeur à coulisseau vertical, ce qui permet de lui donner des dimensions plus importantes que celles des étaux-limeurs. L'intérêt des mortaiseuses est surtout le découpage de pièces épaisses, le contournage et les rainurages, notamment lorsque ceux-ci se trouvent placés sur les pièces à des endroits tels que le fraisage est très difficile à réaliser (fig. III-30).

L'inconvénient des mortaiseuses est que les outils ne peuvent pas être relevés comme dans les étaux-limeurs et, par conséquent, ils s'usent rapidement. On a tenté de leur adapter des dispositifs permettant à l'outil de s'échapper en fin de course, système qui s'apparente beaucoup à celui qui est utilisé dans le rabotage.

6. LES FRAISEUSES

Ce sont des machines-outils qui ne sont peut-être pas aussi répandues que les tours mais qui ont pris, après eux, un développement considérable dans l'industrie. Leur caractéristique essentielle réside dans la nature de l'outil utilisé qui est la fraise, munie de plusieurs arêtes coupantes distribuées sur un corps cylindrique, conique ou de « forme ». Par ailleurs, la fraise est un outil tournant autour d'un axe de telle sorte que les arêtes coupantes sont affectées d'un déplacement propre par rapport à une pièce animée d'un mouvement de translation ou de rotation à des vitesses faibles par rapport à celles de la fraise. Les arêtes constituent les extrémités du bloc faisant partie du corps de l'outil ou sont rapportées sur lui (V. chap. 2). De toute manière, ces outils représentent une formule d'outillage plus complexe et plus onéreuse que celle des outils non tournants comme les outils de tour, mais offrant, a priori, plus de rendement.

Il existe plusieurs catégories de fraiseuses et une classification complète conduirait à faire état de très nombreux modèles. On se contentera ici de retenir les types suivants : fraiseuses à broche horizontale (ou fraiseuses horizontales) et fraiseuses à broche verticale (ou fraiseuses verticales).

On peut également distinguer les fraiseuses à console mobile et les fraiseuses à console fixe, les fraiseuses à traverse fixe et les fraiseuses à traverse mobile (ou bélier). Ces définitions apparaîtront plus clairement grâce à la description générale d'une fraiseuse.

6.1. Éléments constitutifs des fraiseuses.

— Une fraiseuse (fig. III-31) comprend une colonne massive, creuse en général, à l'intérieur et au bas de laquelle se trouve le moteur. Des glissières sont placées verticalement sur la colonne ; une console peut coulisser sur ces glissières et prend également appui sur une vis télescopique

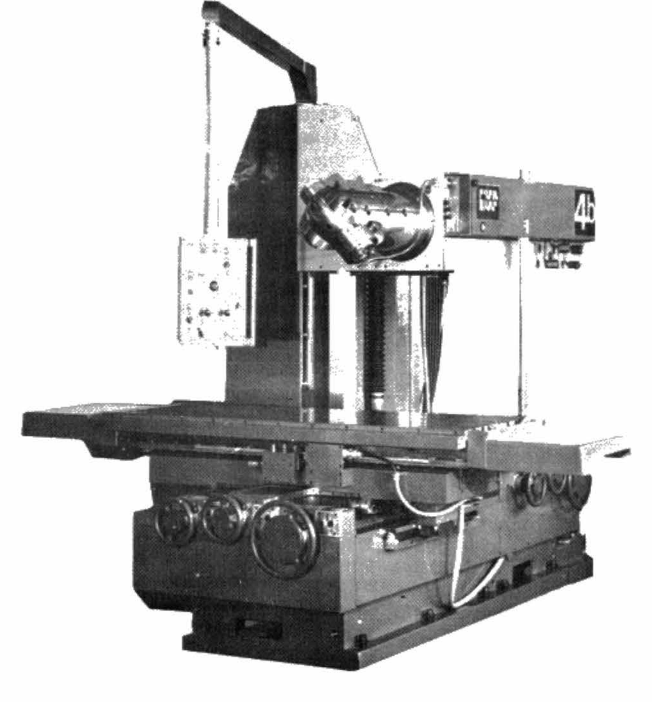


Fig. III-31

Fraiseuse à commande programmée par affichage numérique
(*R. Pellet — Gambin S.A.*)

qui repose sur l'assise de la colonne ; cette vis peut imprimer à la console un déplacement vertical. La console porte un chariot qui reçoit un déplacement transversal en coulissant sur des glissières horizontales et qui porte une table sur laquelle repose la pièce à usiner ; cette table reçoit un déplacement longitudinal en coulissant également sur des glissières portées par la console. Pour certaines applications, un chariot intermédiaire entre la table et le chariot principal permet de réaliser un déplacement oblique par rapport au déplacement normal, tout en restant dans le même plan horizontal que celle-ci. De même, grâce à une table de déplacement circulaire, par rotation autour d'un axe vertical, on peut exécuter des usinages en coordonnées polaires.

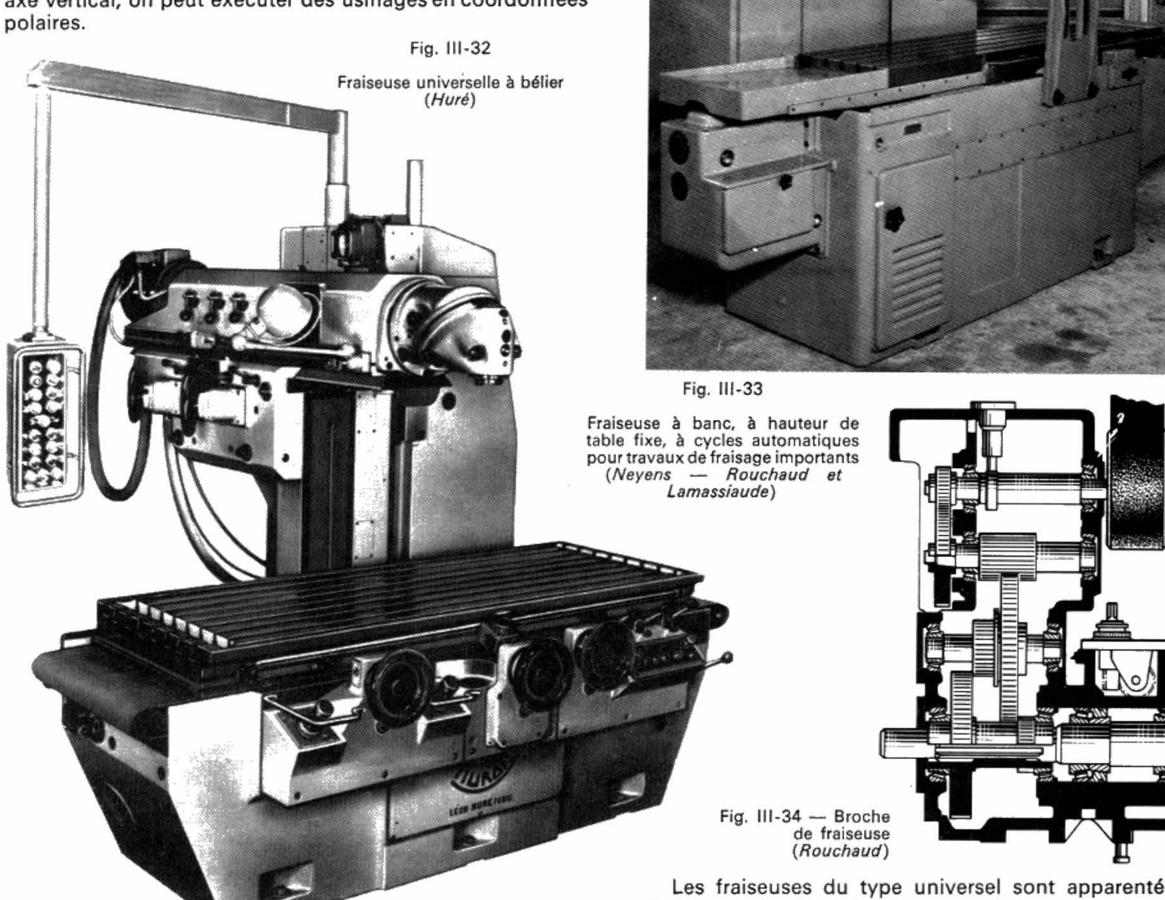


Fig. III-32

Fraiseuse universelle à bélier (*Huré*)

Fig. III-33

Fraiseuse à banc, à hauteur de table fixe, à cycles automatiques pour travaux de fraisage importants (*Neyens — Rouchaud et Lamassiaude*)

Fig. III-34 — Broche de fraiseuse (*Rouchaud*)

Le haut de la colonne, ou bras support, est construit de deux manières différentes suivant qu'il s'agit de fraiseuse horizontale ou de fraiseuse verticale.

Dans le premier cas, il supporte le logement de la broche porte-fraise et, presque toujours aussi, le logement d'une barre portant d'une part une lunette destinée à supporter la broche porte-fraise, d'autre part les extrémités de deux bretelles qui peuvent être fixées à la console et qui supportent l'extrémité de la broche en vue d'en assurer la rigidité dans le cas de travaux nécessitant une grande puissance. Si l'on désire assurer à la fraise un déplacement transversal, il faut que le bras-support puisse coulisser sur des glissières portées par le haut de la console ; la traverse prend alors souvent le nom de bélier (fig. III-32).

Dans le deuxième cas, la partie supérieure de la colonne porte deux glissières verticales sur lesquelles peut coulisser l'arbre porte-broche de la fraise. L'extrémité de la colonne peut avoir la forme d'un col de cygne mais, si l'on désire que la broche soit inclinable, les glissières sont portées par un chariot tournant soit autour d'un axe horizontal, si le porte-fraise est normal, soit autour d'un centre si le porte-fraise a la forme d'une sphère. Plusieurs constructeurs ont apporté à ce problème des solutions originales qu'on désigne en disant que les fraiseuses peuvent usiner la partie inférieure de leur propre table.

Les fraiseuses du type universel sont apparentées aux fraiseuses horizontales en ce qui concerne leur forme générale ; en plus elles présentent un dispositif permettant de monter une tête verticale, inclinable ou non. D'une manière générale, les fraiseuses universelles n'offrent pas le même rendement dans leur version horizontale que dans leur version verticale, mais elles permettent, parfois, de faire l'économie d'une fraiseuse verticale.

Pour certains travaux, le dispositif de console mobile ne présente pas une résistance suffisante (fig. III-33). La fraiseuse est alors équipée d'une console fixe. La rigidité ainsi obtenue permet des travaux simultanés avec plusieurs fraises et le rendement est amélioré.

D'autres modèles de fraiseuses sont utilisés dans l'industrie, soit pour des travaux de fraisage proprement dits, soit pour des travaux combinés avec d'autres formules : les fraiseuses d'opérations munies de montages plus ou moins complexes rentrent dans la première catégorie. Les fraiseuses-raboteuses, les aléseuses-fraiseuses et les machines à tailler les engrenages à l'aide de fraises rentrent dans la deuxième catégorie.

Les broches de fraiseuses ont beaucoup d'analogie avec les broches de tour (fig. III-34) ; en général elles sont montées avec des roulements à rouleaux coniques dont le nombre dépend de leur longueur. Le mouvement est transmis à la broche par une boîte de vitesses. Les déplacements de la console et des chariots sont obtenus par vis et écrou. Quant au dispositif d'avance de la table, il est

fréquemment placé dans le bâti; son mouvement est transmis à la console par cardans ou par pignons coniques coulissant sur un arbre cannelé.

La fraise peut travailler « en bout » ou en « roulant »; elle peut exécuter ces travaux normalement ou « en avalant », dans le cas du fraisage « en roulant ».

On considère qu'il existe deux grandes catégories de travaux: d'une part sur métaux ferreux, d'autre part sur métaux et alliages non ferreux, légers et ultra-légers. Dans le premier cas, on admet une pente d'hélice de 10° environ, dans le deuxième cas, on admet 20 à 25°. Le tableau ci-joint donne les vitesses de coupe (en mètres par minute) suivant les matières usinées et la nature de l'outil, les vitesses les plus faibles étant utilisées pour l'ébauche.

Matériau à usiner	Acier rapide	Carbure
Fonte ordinaire	10 à 15	40 à 60
Acier R = 50 B	15 à 20	40 à 50
Aciers spéciaux	8 à 14	30 à 50
Bronze	25 à 30	80 à 150
Alliages légers à faible teneur en silicium	150 à 300	300 à 1 000
Alliages légers à teneur moyenne en silicium	60 à 80	150 à 300

L'avance totale est le produit de l'avance pour chaque dent, du nombre de dents et de la vitesse de coupe (en tours par minute). L'avance par dent est comprise entre 0,15 et 0,5 mm pour les travaux courants; pour la finition, la recherche de la précision conduit à déterminer l'épaisseur minimale du copeau qui est comprise, en général, entre 0,05 et 0,1 mm.

Les capacités d'usinage des fraiseuses sont notablement accrues par l'emploi de montages et d'appareils spéciaux tels que les diviseurs. Grâce à ces montages, il est possible d'usiner des pièces en grandes séries, surtout avec des fraiseuses à table fixe et des fraiseuses multiples; grâce aux diviseurs, il est possible de réaliser des usinages très particuliers, par exemple d'usiner des pièces à profil hélicoïdal.

6.2. Domaines d'emploi autres que le fraisage. — D'autres travaux que le fraisage sont également possibles à l'aide d'une fraiseuse puisque l'on dispose d'un mouvement rectiligne et d'un mouvement circulaire. Le perçage, en particulier, se fait sans difficulté et si l'on doit percer plusieurs trous à des emplacements déterminés, un diviseur permet une indexation facile du travail.

6.2.1. Alésage. — Il ne présente pas de difficultés particulières; il est même parfois plus facilement réalisable que le perçage, car il ne demande pas de vitesses de rotation aussi grandes.

6.2.2. Mortaisage (fig. III-35). — C'est une des opérations que l'on exécute d'autant plus couramment que les mortaiseuses proprement dites ont tendance à disparaître. Le nombre de passes par minute est égal au nombre de tours par minute de la broche sur laquelle est fixé le dispositif à mortaiser. La vitesse maximale C de coupe de l'outil est donnée par la formule :

$$C = \frac{NS}{3{,}82}$$

où S est la longueur de la passe, N le nombre de passes par minute et 3,82 un coefficient donné par la pratique.

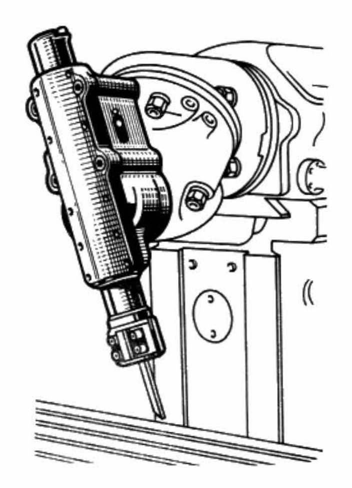


Fig. III-35

Appareil à mortaiser

L'appareil à mortaiser peut également servir pour tracer des graduations sur des tambours. On fixe alors le tambour à graduer sur la broche d'une poupée-diviseur et l'on place l'outil à mortaiser horizontalement, de telle sorte qu'il se présente comme un outil à fileter. Le trait est marqué au moyen de l'avance longitudinale de la table. Il ne se présente aucune difficulté particulière d'indexation. Si le tambour à graduer est conique, il suffit d'incliner le porte-outil de mortaisage d'un angle tel que le déplacement de l'outil soit parallèle à la génératrice du cône.

6.2.3. Poupée-diviseur (fig. III-36). — C'est un accessoire particulièrement intéressant qui permet d'indexer des rotations avec une très grande précision. Elle peut être montée à la fois sur la contre-pointe et sur la pièce tenue par la pointe à son autre extrémité; toute rotation est ainsi effectuée et répétée d'une manière précise. Suivant les fabrications, le dispositif est mécanique ou optique.

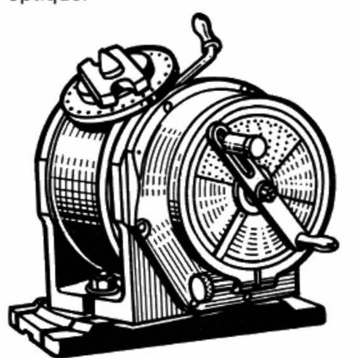


Fig. III-36

Poupée-diviseur universelle

L'emploi d'une poupée-diviseur permet de réaliser sans difficulté des travaux de tournage et d'alésage; ces travaux ne sont pas courants, mais certains constructeurs de fraiseuses, comme la firme allemande Werner et la firme française Huré, en ont fait depuis longtemps la démonstration.

6.2.4. Appareils de taillage d'engrenages. — Sur les fraiseuses (notamment la fraiseuse Huron dont la traverse ou bélier est mobile; fig. III-37) on peut tailler des engrenages droits, avec fraise-mère, d'une manière continue. On utilise à cet effet un système de deux renvois

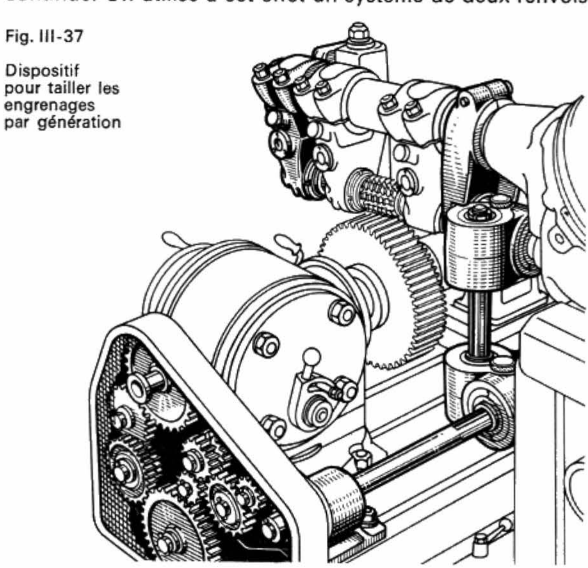


Fig. III-37

Dispositif pour tailler les engrenages par génération

à axes perpendiculaires et d'arbres cannelés pour entraîner la poupée-diviseur à partir de la broche de la machine. La rotation de la fraise-mère et celle de la pièce qui est fixée au mandrin de la poupée-diviseur deviennent ainsi solidaires. Le nombre de dents du pignon à tailler varie ainsi de 4 pour les arbres à baguettes à 120 et plus pour les roues dentées.

6.3. Fraiseuses de grande production. — À côté de ces opérations qui sont du domaine des travaux unitaires et spéciaux, il est intéressant de rappeler que le fraisage est une opération s'adaptant très bien aux travaux de séries. Pendant longtemps, et notamment dans la fabrication des armes, on a pratiqué la méthode consistant à confier à chaque fraiseuse faisant partie d'une chaîne de travail, une seule opération simple. Cette méthode, qui s'apparente à celle des chaînes de transfert mais sans la facilité de transfert automatique des pièces d'un poste à un autre, tend de plus en plus à être remplacée par le fraisage à plusieurs outils sur une même machine. Ce genre de travaux, qu'on appelle duplex, triplex, etc., suivant le nombre de fraises utilisées, ne peut être réalisé efficacement qu'avec des fraiseuses renforcées et, notamment, à console fixe. Que la fraiseuse soit munie d'un seul outil ou de plusieurs outils, l'intérêt du travail est son automatisation.

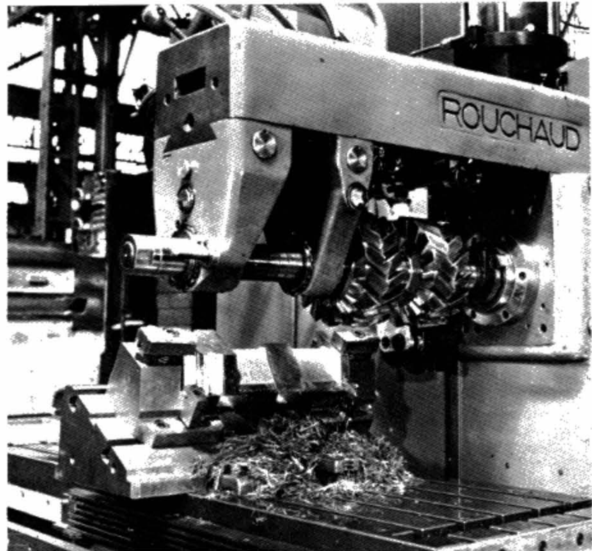


Fig. III-38 — Fraiseuse équipée de quatre fraises (*Rouchaud et Lamassiaude*)

La pièce — s'il y a lieu, le groupe de pièces que l'on veut usiner ensemble — est montée sur la table (fig. III-38). L'usinage peut être exécuté avec plusieurs fraises et à des vitesses variables ; plusieurs fraises sont nécessaires si l'on désire usiner à la fois les faces latérales et la face supérieure d'une pièce ayant une forme prismatique. Le contact de la pièce avec l'un ou l'autre groupe de fraises est obtenu par des déplacements automatiques. En ce qui concerne les vitesses, les constructeurs prévoient à l'avance les valeurs nécessaires pour usiner plus ou moins vite suivant que les surfaces sont continues, présentent des ressauts ou des inégalités ; ces variations sont incorporées dans le cycle de travail qui comporte un premier réglage manuel au cours duquel sont mises en place des butées de réglages pour tous les mouvements, y compris le démarrage et l'arrêt. Ces butées permettent d'obtenir, au moyen d'embrayages électromagnétiques, des précisions d'arrêt voisines de 0,02 mm. Plusieurs constructeurs de fraiseuses courantes n'ont pas manqué de s'intéresser aux fraiseuses de production de cette nature aussi bien en France qu'à l'étranger, et de très nombreux modèles sont utilisés partout où un très grand rendement est nécessaire et, notamment, dans l'industrie automobile.

6.4. Applications particulières. — Les fraiseuses peuvent affecter des formes variées en vue de certaines applications particulières. On peut citer entre autres :

6.4.1. Fraiseuses latérales. — Ces machines sont destinées à l'usinage de pièces dont le poids et l'encombrement sont tels qu'il faut laisser sur la machine une très grande place disponible (fig. III-39). Elles se composent d'un bâti portant des glissières sur lesquelles coulisse un autre bâti ; celui-ci porte une console qui coulisse verticalement. À la partie supérieure de la console, se trouve un bras transversal, ou bélier, portant une tête porte-broche. Les mouvements du bâti, de la console et du bélier sont rendus automatiques à l'aide d'une boîte de vitesses incluse dans la console. Des sécurités spéciales empêchent d'effectuer l'embrayage correspondant à des mouvements dont les organes sont bloqués. Les déplacements sont contrôlés soit par des compteurs, soit par des règles et les pièces sont placées sur des tables ou des montages spéciaux. Pour les grandes machines, une passerelle fixée à la console permet à l'opérateur une surveillance constante.

On peut facilement exécuter des alésages à la barre ; le déplacement de la barre est commandé par le bélier auquel

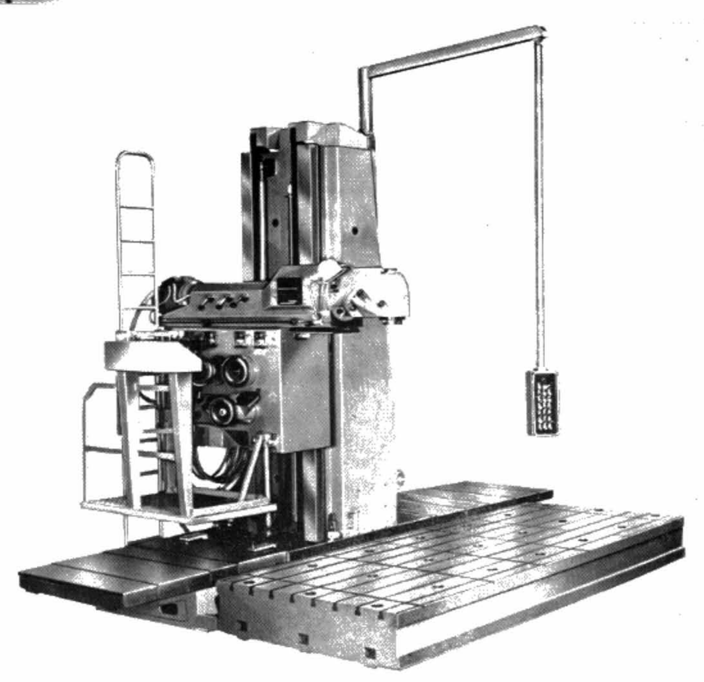
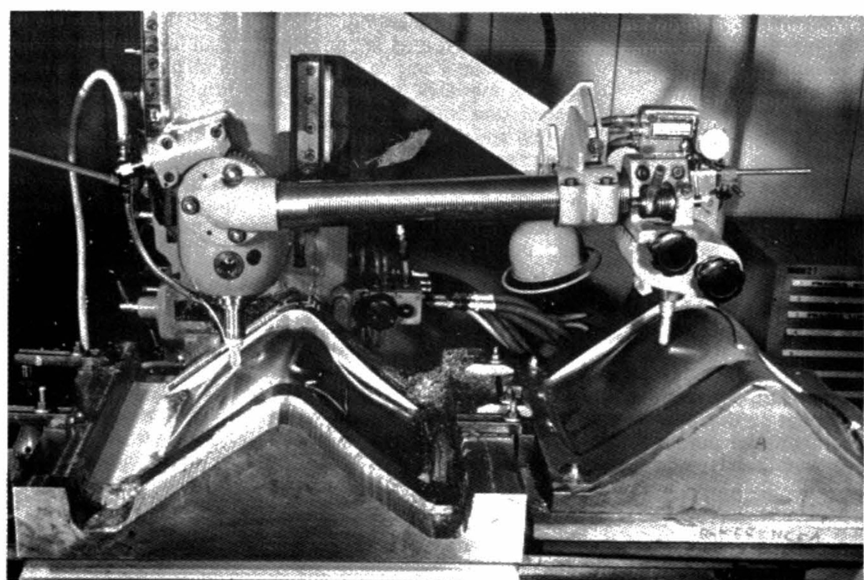


Fig. III-39

Fraiseuse latérale (*Huré*)



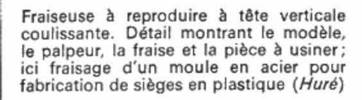
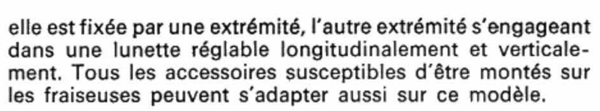


Fig. III-40

Fraiseuse à reproduire à tête verticale coulissante. Détail montrant le modèle, le palpeur, la fraise et la pièce à usiner; ici fraisage d'un moule en acier pour fabrication de sièges en plastique (*Huré*)



elle est fixée par une extrémité, l'autre extrémité s'engageant dans une lunette réglable longitudinalement et verticalement. Tous les accessoires susceptibles d'être montés sur les fraiseuses peuvent s'adapter aussi sur ce modèle.

6.4.2. Fraiseuses-raboteuses. — Ces fraiseuses comportent une table de longueur nettement plus grande que les machines ordinaires ce qui les apparente aux raboteuses; grâce à des porte-outils appropriés on peut, d'ailleurs, associer des opérations de fraisage et de rabotage. À propos des aléseuses, on retrouvera une formule analogue: les machines dites aléseuses-fraiseuses dont la vogue, sous le nom de centres d'usinage, est actuellement considérable.

6.4.3. Fraiseuses à reproduire. — Dans ce domaine, des résultats très intéressants sont obtenus et par un procédé simple en théorie. Un palpeur (fig. III-40), placé à l'extrémité d'une barre, est en contact avec un modèle en bois, en fonte ou en une autre matière (ciment, plastique) facile à travailler. Le mouvement du palpeur est transmis à la broche portant la fraiseuse qui, pour l'usinage à réaliser, suit exactement les contours du modèle. Les difficultés signalées à l'occasion des reproducteurs pour tours se retrouvent ici et les moyens de les éviter sont les mêmes. Le travail de reproduction ainsi réalisé est extrêmement intéressant puisque l'on peut utiliser un modèle pour de très nombreuses opérations. L'une des applications les plus connues est celle de certains éléments de carrosserie automobile dont l'exécution demandait autrefois un travail de chaudronnerie long et délicat.

La firme Huré a amplifié le reproducteur en transmettant à plusieurs machines, dites « machines-filles », les déplacements obtenus au moyen d'un reproducteur par une fraiseuse dite « mère »; celle-ci fonctionne comme il a été indiqué ci-dessus et tous les mouvements nécessaires à l'usinage de la pièce conforme au modèle sont transmis par des procédés électromagnétiques simples à chacune des fraiseuses « filles » chargées d'exécuter le même usinage.

En commande numérique, on retrouvera de nombreuses applications du fraisage pour des usinages très variés.

7. LES PERCEUSES

Le perçage est une opération connue depuis très longtemps puisque des perceuses ont existé sous une forme simple dès l'Antiquité. Ces machines ont été perfectionnées au cours des années de telle sorte que, s'il reste toujours un nombre très important de perceuses simples à l'usage de l'artisanat, des modèles très perfectionnés ont aussi été mis au point depuis la perceuse radiale à capacité de travail considérable jusqu'aux perceuses multiples qui permettent, dans une fabrication déterminée, de réaliser des travaux avec un grand rendement. Dans le cas des perceuses, l'avènement de la commande numérique, grâce au système « point par point », a également apporté des possibilités nouvelles très intéressantes pour réaliser des perçages en séries petites et moyennes.

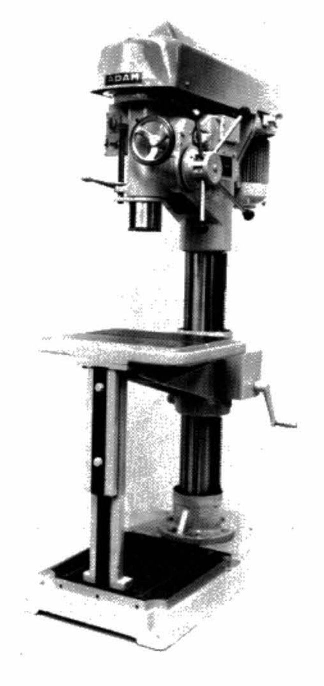


Fig. III-41 — Perceuse sur colonne; capacité de perçage: 60 mm (*Arsicaud et Fils — Adam*)

7.1. Perceuses sensitives. — La perceuse la plus simple est appelée sensitive; elle se compose d'un socle portant une colonne sur laquelle est fixé un bras de longueur réduite, portant à son extrémité la broche dans laquelle est engagé le foret. La broche tourne sous l'action d'un moteur soit directement, soit par l'intermédiaire d'une transmission. Le mouvement de montée et descente de la broche s'effectue sous l'action d'un levier manié à la main, par l'intermédiaire d'un système à crémaillère et engrenages. C'est à la main qu'on apprécie la résistance au perçage et le moment où il est nécessaire de relever le foret pour faciliter l'évacuation des copeaux (d'où la qualification de « sensitive »).

Une telle perceuse peut être autonome; elle peut aussi être munie d'un socle permettant de la placer sur un support fixe et elle prend alors le nom de perceuse d'établi (V. fig. I-12); ses emplois sont extrêmement nombreux. Les perceuses sensitives peuvent tourner à très grandes vitesses, atteignant 18 000 tours par minute. Dans certains modèles perfectionnés, la commande de la broche peut être automatisée.

7.2. Perceuses sur colonne. — Un autre type de perceuse très répandu est la perceuse dite sur colonne (fig. III-41). Elle ne diffère de la précédente que par ses dimensions plus importantes. Une de leurs caractéristiques est d'avoir une table, en général circulaire, qui peut tourner autour de la colonne, ce qui permet d'exécuter des perçages sur des pièces encombrantes. Elles ne sont utilisées

que pour des diamètres de perçage inférieurs à 20 mm, en raison des porte-à-faux qu'elles présentent. Il est rare que l'on puisse utiliser ces machines pour des perçages atteignant 10 mm et même, dans la généralité des cas, 5 mm.

7.3. Perceuses à montant. — Les perceuses dites à montant ont à l'extrémité de la colonne un bras de longueur assez grande pour permettre l'usinage de pièces encombrantes; la table, au lieu de tourner autour de la colonne, peut effectuer un mouvement longitudinal et un mouvement transversal, tous les deux susceptibles d'être contrôlés avec précision, ce qui permet l'usinage de séries de trous dans le même plan. Leur capacité de perçage dans l'acier peut atteindre 90 mm.

7.4. Perceuses radiales. — Les perceuses radiales (fig. III-42) sont caractérisées par le fait que la pièce reste fixe sur la table, elle-même fixe. Le bras peut se déplacer verticalement sur la colonne et également tourner autour de l'axe de celle-ci. Le chariot porte-broche se déplace par coulissement le long du bras, de telle sorte que le foret peut prendre toutes les positions possibles à l'intérieur du volume balayé par le bras dans ses déplacements. Dans certains modèles, le chariot porte-foret peut donner à la broche une inclinaison plus ou moins grande. Dans une version spéciale, dite radiale de chaudronnerie, il n'est pas nécessaire d'avoir un socle, qu'on appelle aussi taque; la colonne est fixée sur le sol par un moyen quelconque et la pièce à percer, en général de grandes dimensions, se déplace devant elle ou bien, dans la majorité des cas, la perceuse est amenée à l'endroit exact où le perçage a lieu.

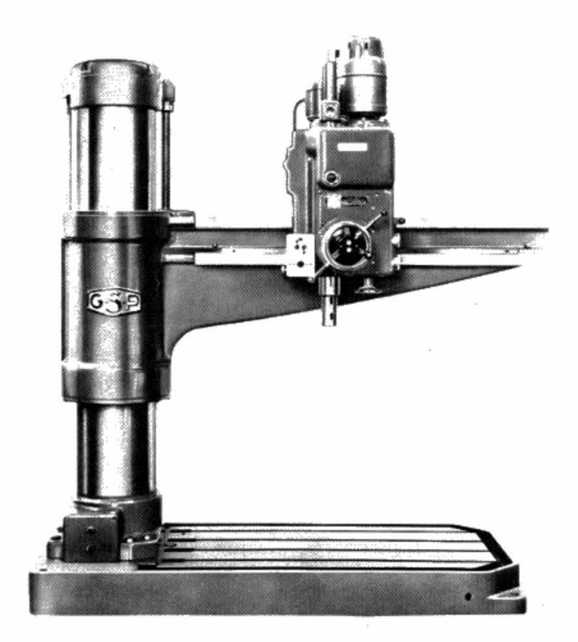


Fig. III-42 — Perceuse radiale (*G.S.P.*)

7.5. Les perceuses multiples. — Dans ces machines la broche porte plusieurs forets et forme une tête revolver (fig. III-43). Mais la version industrielle la plus moderne est l'unité de perçage (fig. III-44), système dans lequel un nombre parfois très grand de forets (plusieurs dizaines) est groupé sur une même tête; des dispositifs spéciaux leur communiquent des mouvements de rotation et d'avance. Dans les versions encore plus modernes, les unités de perçage incorporées dans une chaîne font partie d'un ensemble placé sous le contrôle d'une commande numérique.

7.6. Les techniques du perçage. — D'une manière générale, les problèmes que pose le perçage sont les suivants: montage du foret dans la broche de manière à obtenir la vitesse que l'on désire, mesures à prendre pour combattre le porte-à-faux.

Le foret, autrefois en forme dite de « langue d'aspic », c'est-à-dire à corps plat terminé par une pointe, est actuellement hélicoïdal, forme qui permet un travail mieux réparti, une évacuation de copeaux meilleure, le maintien du diamètre même après plusieurs réaffûtages. Il se compose d'une queue cylindrique ou conique et d'une partie coupante formée de la pointe avec les arêtes de coupe, des bandes de guidage et des rainures ou goujures de fixation. L'angle de l'hélice est voisin de 30° et l'angle de la pointe de 120° pour l'acier et la fonte. Pour le cuivre et les alliages légers, il est préférable de prendre des angles respectivement de 40° et 140°.

Pour les matières telles que le magnésium et l'ébonite, on choisit plutôt des pas allongés. Les vitesses de coupe et les avances sont variables avec la nature du foret et avec celle de la pièce à percer; comme dans tous les usinages, la finition est d'autant meilleure que la vitesse de coupe est plus grande et l'avance plus faible. Le refroidissement par arrosage est particulièrement recommandé.

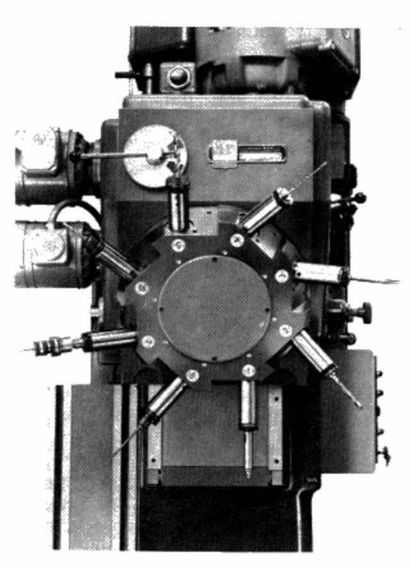


Fig. III-43
Perceuse multibroches
(*G.S.P.*)

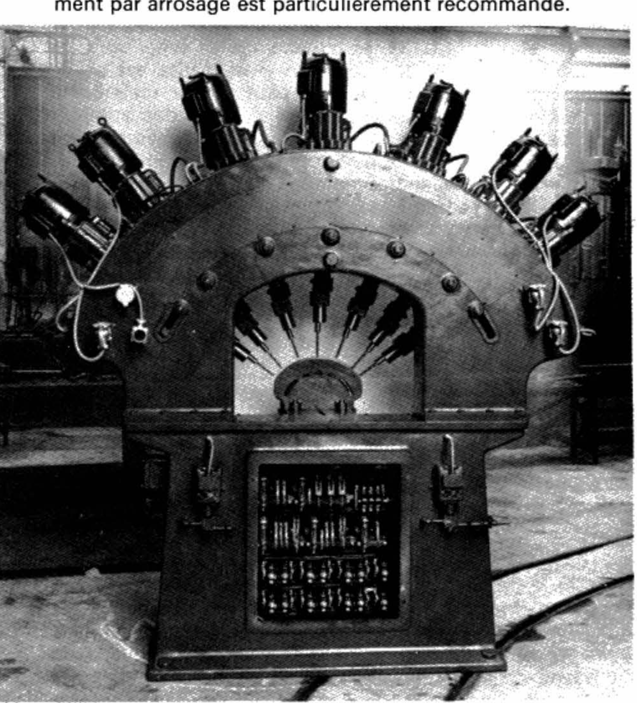


Fig. III-44
Unité de perçages à sept têtes

Conditions de coupe pour forets en acier rapide

Matériau à usiner	Pas de l'hélice	Vitesse de coupe (mètres par minute)	Avance en millimètres par tour suivant les diamètres					Liquide d'arrosage
			2	5	10	25	50	
Aciers de construction :								
$R < 50$ (1)	normal	25 à 40	0,03	0,11	0,20	0,30	0,40	huile soluble
$50 < R < 70$	normal	25 à 32	0,03	0,10	0,16	0,30	0,40	huile soluble
$R < 70$	normal	20 à 25	0,02	0,07	0,14	0,25	0,35	huile soluble
Aciers alliés :								
$70 < R < 90$	normal	12 à 20	0,02	0,06	0,12	0,22	0,30	huile soluble ou huile de coupe
$90 < R < 110$	normal	8 à 15	0,01	0,04	0,10	0,18	0,25	huile de coupe
Fonte $R < 20$	normal	20 à 35	0,06	0,16	0,25	0,45	0,60	à sec
Fonte $R > 20$	normal	15 à 25	0,04	0,09	0,18	0,30	0,40	à sec ou pétrole
Acier inoxydable	normal	7 à 12	0,02	0,06	0,12	0,22	0,30	huile soluble
Laiton de décolletage	allongé	100 à 120	0,07	0,16	0,30	0,50	0,70	à sec ou huile soluble
Laiton dur	allongé	50 à 60	0,04	0,10	0,16	0,30	0,45	huile soluble
Bronze	normal	40 à 50	0,04	0,12	0,20	0,30	0,45	huile soluble
Aluminium pur	serré	jusqu'à 150	0,04	0,08	0,12	0,22	0,30	huile soluble
Alliages légers à faible teneur en silicium	serré	jusqu'à 120	0,06	0,16	0,30	0,50	0,70	huile soluble
Alliages légers à teneur en Si de 9 à 13 %	serré	jusqu'à 80	0,05	0,14	0,20	0,30	0,40	huile de coupe
Alliages de magnésium	allongé	jusqu'à 200	0,07	0,20	0,35	0,63	0,80	à sec
Ébonite	allongé	30 à 50	0,08	0,40	0,20	0,30	0,40	à sec ou avec jet d'air comprimé
Bakélite	allongé	15 à 20						
Fibre	serré	100 à 150						

(1) R : résistance à la rupture en hectobars

Pendant les perçages normaux, la pièce est maintenue en place par la pression même de l'outil, ce qui évite d'utiliser des montages compliqués. Quant aux forets, ils sont mis en place par mandrin pour les forets à queue cylindrique et par l'intermédiaire de douilles pour les forets à queue conique. Le montage conique, en principe, est le plus efficace et il est recommandé aussitôt que le diamètre de perçage atteint 10 mm. Lorsque le perçage est profond, il peut être nécessaire d'amener le liquide d'arrosage jusqu'à la pointe de l'outil en munissant le foret soit de cannelures intérieures, soit d'un trou intérieur. De plus, l'emploi de pointes rapportées en carbure prend actuellement de plus en plus d'importance.

Le porte-à-faux est le point faible des perceuses aussitôt qu'elles sont munies de montants qui permettent des perçages éloignés de la colonne. Le travail de perçage conduit au soulèvement du bras et, par conséquent, à l'inclinaison du foret qui dévie alors pendant le perçage ; de ce fait, il a été souvent admis qu'un travail de perçage seul ne pouvait être précis et devait être obligatoirement complété par un alésage qui est toujours une opération de finition et ne donne pas de réactions brutales sur la machine. Il y a quelques années, on admettait que le bras pouvait se plier élastiquement pendant le perçage à condition que cette flexion ne dépasse pas une certaine valeur. Actuellement, on s'efforce de donner au bras une forme lui permettant de conserver une rigidité aussi grande que possible et on tient davantage compte de la force de perçage à ne pas dépasser. Une autre tentative a été faite par la firme Oerlikon pour garder la rigidité du bras ; elle consiste à maintenir l'extrémité libre de celui-ci par une colonne auxiliaire. Cette formule paraît irréprochable en principe, mais elle ne semble pas s'être répandue, probablement parce que la présence de cette colonne limite trop l'encombrement des pièces à usiner.

Les conditions de coupe des forets varient avec le progrès technique et il est difficile de garantir que les chiffres donnés seront toujours vrais quelque temps après. Compte tenu de cette réserve, le tableau ci-dessus donne une idée des performances que l'on peut attendre du perçage effectué selon certaines données.

8. LES ALÉSEUSES

En principe, l'objet de l'alésage est, de compléter le perçage en apportant à un trou, obtenu avec un foret, une finition qui en garantit les dimensions et l'état de surface.

8.1. Alésoirs. — L'alésage s'effectue avec des outils appelés alésoirs qui sont très simples dans leur principe ; ces outils pourraient être, jusqu'à un certain point, assimilés à une dent de fraise montée sur un arbre tournant. Leur forme et leur arête doivent être telles que le travail ne laisse pratiquement aucune trace sur la surface alésée ; comme le mouvement d'alésage est hélicoïdal, il faut que l'alésoir arrive à effacer aussi complètement que possible les traces laissées par l'usinage lui-même. En fait, cette condition ne peut que difficilement être réalisée et les surfaces intérieures, pour lesquelles un excellent état de surface est demandé, doivent presque toujours être rodées.

8.2. Description de la machine. — Les aléseuses sont caractérisées avant tout par la très grande précision de leurs organes et de leurs mouvements. En effet, la pièce doit être montée sur la machine de manière à éviter tout dépassement des tolérances provenant de cette opération (d'où la nécessité de disposer d'un appareillage de mesure très précis). Par ailleurs, l'aléseuse travaille soit « en l'air », soit à la barre. Dans le premier cas, il faut prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter les porte-à-faux (les pièces à usiner doivent notamment être courtes). Dans le deuxième cas, la barre d'alésage doit être soutenue à son extrémité libre par une lunette dont l'axe doit coïncider exactement avec celui de la broche.

Une aléseuse (fig. III-45) comprend un banc muni de deux glissières horizontales sur lesquelles se déplace le chariot porte-table. Sur la partie avant se trouve un montant vertical fixé au banc et qui porte deux glissières verticales sur lesquelles coulisse le chariot porte-broche ; ce chariot supporte la boîte de vitesses, la boîte d'avances. La broche et les mouvements sont transmis aux vis qui assurent les déplacements au moyen de pignons coniques et d'arbres cannelés. Les mouvements de rotation et de translation de

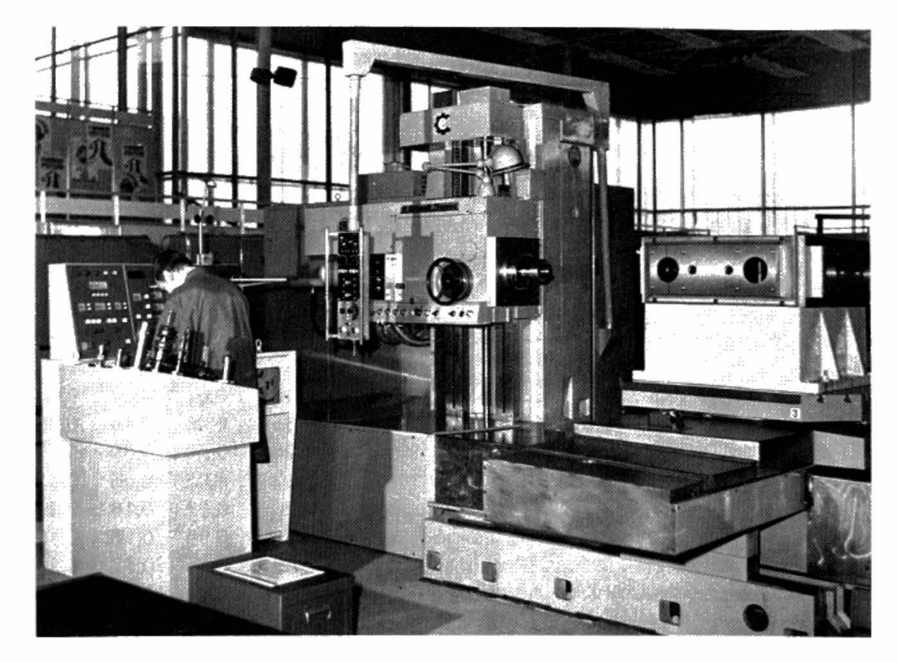


Fig. III-45

Aléseuse-fraiseuse
(*Ernault — Somua*)

la broche se font de la même façon que sur les perceuses. La table peut se déplacer longitudinalement et transversalement; elle est parfois munie d'un dispositif lui permettant une rotation. En général, seul le déplacement longitudinal est automatique, mais si la commande numérique est utilisée, tous les mouvements doivent pouvoir être automatisés.

La broche peut supporter soit un plateau à surfacer, soit la barre d'alésage proprement dite. Le plateau à surfacer se monte comme sur les tours. Quant à la barre d'alésage, elle a son extrémité maintenue par une lunette supportée par une colonne placée sur la partie arrière du banc. Les constructeurs s'efforcent de plus en plus de synchroniser les déplacements verticaux de la broche et de la lunette, laquelle peut se déplacer le long de la colonne sous l'action d'une vis.

La capacité d'une aléseuse est fixée par le diamètre de la broche; on définit, par exemple, une aléseuse en disant: aléseuse de 60 mm. La capacité d'alésage courante varie entre 60 et 200 mm; certaines aléseuses dépassent même cette capacité. Les outils des aléseuses sont montés de façon différente selon les travaux à réaliser. Les forets de perçage sont placés sur la barre elle-même. Les outils de tourillonnage sont montés sur le plateau à surfacer; il en est de même des outils pour alésages peu profonds lorsqu'ils ne sont pas montés sur la barre elle-même. Quant aux outils d'alésage à la barre ou de filetage et tournage, ils sont, eux aussi, montés sur la barre d'alésage.

Lorsque les outils à aléser sont montés sur la barre d'alésage, ils sont simplement emmanchés dans celle-ci et bloqués par une clavette ou une vis; s'il s'agit d'alésages de petits diamètres pour faire saillir plus ou moins l'outil, on place, parfois, à l'arrière une autre vis qui permet un réglage précis. Parfois on utilise des outils doubles pour augmenter l'efficacité. On se sert également d'outils flottants c'est-à-dire d'outils pouvant légèrement se déplacer perpendiculairement à l'axe; de tels outils n'exécutent pas un travail au sens propre du terme mais ils sont plutôt utilisés pour faire du calibrage. Dans le cas des alésages de grands diamètres, on utilise un manchon portant un ou plusieurs outil que l'on fixe sur la barre par clavetage; des dispositifs spéciaux permettent le réglage des outils en diamètre. On utilise encore, mais assez rarement, des manchons qui coulissent sur l'arbre que l'on maintient fixe au moyen d'un dispositif à vis et écrou.

Lorsqu'on utilise un plateau à surfacer, on peut obtenir des faces planes et perpendiculaires à l'axe; les plateaux sont munis de chariots qui impriment aux outils une avance dans le sens radial.

Les travaux que l'on peut demander aux aléseuses: tournage, filetage, etc., sont obtenus par déplacement soit de la table, soit de la pièce; aucune précaution particulière n'est à prendre et les passes d'usinage sont toujours assez faibles pour éviter des broutements.

Les aléseuses peuvent être à montant mobile, pivotant autour d'un axe vertical et également à broche véritable. Elles peuvent ne pas avoir de taque et se déplacer le long des pièces à aléser, comme c'est le cas en chaudronnerie.

En raison de toutes les conditions qu'elle doit remplir, l'aléseuse est inévitablement une machine d'un prix élevé. De plus, pour remplir sa mission de base, qui est l'alésage, elle est dotée de possibilités qui dépassent largement cette catégorie d'opérations; par ailleurs, il est courant que l'on désire supprimer au maximum les démontages et remontages qui accompagnent les travaux de reprise. C'est pourquoi les aléseuses ont été modifiées sans cesse afin qu'elles puissent effectuer le plus grand nombre de travaux possibles.

8.3. Domaine d'emploi. — Les travaux les plus courants qui leur sont demandés sont:

Le perçage : la barre d'alésage peut être remplacée par une broche de perçage dont le travail ne doit pas dépasser le point à partir duquel les réactions sont nuisibles à la précision de la machine.

Le fraisage : cette opération est si naturellement utilisée que l'on ne trouve pratiquement plus d'aléseuses simples et qu'on appelle, d'une manière courante, ces machines: aléseuses-fraiseuses.

Le tourillonnage qui consiste à usiner des surfaces circulaires concentriques à la barre, soit intérieurement, soit extérieurement, avec des outils simples montés sur la barre.

L'alésage à partir du plateau à surfacer et l'alésage à la barre qui sont les opérations de base.

Le filetage et, jusqu'à un certain point, *le tournage;* le filetage intérieur, en particulier, s'effectue sans difficultés à l'aide de la barre d'alésage.

Peu à peu, tous ces travaux ont été demandés aux aléseuses et l'emploi de la commande numérique a rendu possible la coordination de toutes les opérations suivant un plan de travail établi à l'avance. Cette technique nouvelle a montré l'intérêt qui s'attachait à réaliser des changements d'outils automatiques et, dans certains cas, la mise en place et l'enlèvement automatiques des pièces. Cette multiplicité de possibilités a conduit à la réalisation de ce qu'on appelle désormais couramment un centre d'usinage. Il est possible que ce terme s'applique à d'autres machines spéciales, mais pour l'instant, le centre d'usinage est le résultat des travaux réalisés pour augmenter le rendement des aléseuses-fraiseuses. La construction des aléseuses, en vue de prendre en charge ces travaux si variés, a conduit

au renforcement de certains des éléments de cette machine. L'architecture générale n'a pourtant pas réellement changé.

8.4. Perceuses-aléseuses. — Très souvent, on utilise des perceuses-aléseuses qui sont des machines à peu près identiques aux perceuses, mais de construction plus soignée et permettant d'exécuter d'excellents alésages (fig. III-46).

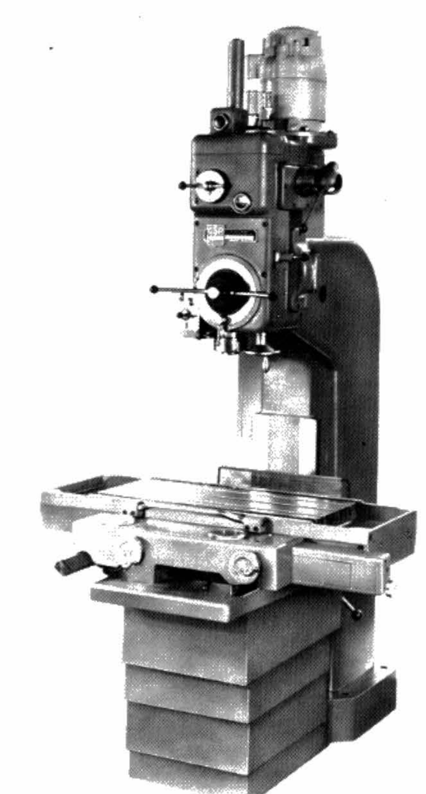


Fig. III-46

Perceuse-aléseuse verticale : table de 800 × 400 mm (*G.S.P.*)

9. LES MACHINES À RECTIFIER

Les machines à rectifier sont essentiellement destinées à la finition des pièces ébauchées et usinées par tous les autres procédés. Parmi les raisons qui motivent l'emploi de la rectification, on peut distinguer la mise à la cote exacte des pièces déformées par le traitement thermique et l'obtention d'un état de surface correspondant aux exigences des utilisateurs. La mise à la cote des pièces déformées par le traitement thermique est très souvent indispensable car il est rare qu'une trempe, même suivie de revenu, n'entraîne pas une modification des dimensions ; toutefois, il n'est pas possible de corriger des cotes présentant des altérations trop importantes car, du fait de l'échauffement qu'engendre la rectification, il se produit des altérations plus ou moins profondes de la qualité de la matière. De plus, il est presque impossible que les travaux de tournage, de fraisage, etc., ne laissent pas de traces d'outils ; le tournage laisse notamment des traces d'hélice correspondant à la rotation de la pièce et à l'avance de l'outil. De plus, toutes les causes de trouble dues aux vibrations se répercutent sur la pièce en causant des erreurs de peu d'importance, parfois impossibles à mesurer, appelées défauts microgéométriques. La nature spéciale du travail de meulage permet de faire disparaître les aspérités ainsi que les éléments saillants laissés par l'usinage. Il en résulte la possibilité d'obtenir des surfaces présentant un état excellent et, notamment, un très beau poli ; parfois, cependant, ce poli est insuffisant et nécessite une opération supplémentaire appelée rodage qui s'effectue à l'aide de pierres. Pendant longtemps on a exécuté une superfinition dont le principe consistait à faire disparaître les aspérités sans créer d'élévation de température locale, susceptible d'altérer la matière première de la surface. Cette opération, qui sera examinée plus loin, tend à disparaître car l'amélioration obtenue n'est pas suffisante pour compenser la perte de temps causée par le démontage et le remontage de la pièce ; de plus, les progrès réalisés dans la confection des meules ont considérablement diminué les risques d'altération dus au meulage, tout au moins lorsqu'il s'agit de travaux de finition.

9.1. Meules. — La fabrication des meules, longtemps artisanale, a fait de considérables progrès depuis quelque temps et ne cesse d'en faire encore, ce qui a permis de réaliser des opérations telles que le meulage rapide auxquelles on n'aurait pu penser autrefois. Un certain secret est gardé par les fabricants de meules sur leurs procédés de fabrication. On peut, toutefois, donner les quelques informations suivantes : une meule est un outil dont les parties coupantes sont fournies par une substance dite abrasive réduite à l'état de grains de grosseur très faible reliés entre eux par une substance non abrasive appelée liant. La meule est donc un outil à coupes multiples, chaque coupe étant fournie par un grain d'abrasif ; la multiplicité des grains entraîne cette régularité de coupe qui est la caractéristique du meulage. Dans la fabrication d'une meule, il faut choisir la qualité d'abrasif correspondant au travail à effectuer, déterminer la forme et la qualité des grains, répartir ceux-ci dans le liant d'une manière homogène et faire subir à l'ensemble, après lui avoir donné la forme voulue par moulage, un traitement qui est, en sorte, une cuisson et un refroidissement, afin de donner à la meule la cohésion indispensable.

La nature de l'abrasif est variable suivant les constructeurs ; beaucoup emploient un abrasif naturel ; c'est le cas des corindons que l'on trouve dans certains pays tels que la Grèce. Il est également possible d'obtenir synthétiquement des abrasifs de qualité. Les grains sont obtenus par broyage et font l'objet d'une sélection sévère afin de former des catégories homogènes, variables, d'ailleurs, suivant les fabrications à réaliser ; la dureté des grains employés varie évidemment avec celle des pièces à meuler. Les liants sont, en général, des produits plastiques et la technique a fait, sur ce point, des progrès considérables.

Pour la fabrication des meules, on vérifie avec soin les produits ; les grains font parfois l'objet d'un examen radiographique et les liants subissent des essais variés de fusion, de solidification, etc. L'association des grains et des liants dépend beaucoup de la forme de la meule en ce qui concerne la densité des grains par centimètre cube, la saillie des arêtes des grains par rapport à la surface théorique de la meule, etc. Une attention toute particulière est apportée à la cohésion des meules pour éviter leur fragmentation ; celle-ci est causée surtout par une rotation trop rapide (dépassement de la résistance des meules à l'inertie centrifuge) mais aussi par la fixation de la meule sur sa monture, au moment du travail, le serrage nécessaire à cette fixation étant susceptible de causer des amorces de rupture. La cohésion des meules fait l'objet d'un contrôle sévère dans beaucoup de pays ; des limitations de vitesse de rotation sont imposées et la plupart des catégories de meules ne peuvent être utilisées qu'à l'abri de protecteurs.

Certaines meules sont parfois utilisées pour des travaux d'ébauche, notamment, sur des raboteuses, moyennant un équipement spécial. Les élévations de température qui se produisent au cours de telles opérations causent, toutefois, comme on l'a indiqué plus haut, des altérations dans la qualité des pièces usinées, ce qui conduit à l'abandon progressif de ce procédé.

9.2. Types de machines à rectifier. — Les machines à rectifier peuvent se classer dans les catégories suivantes : machines à rectifier les surfaces planes, machines à rectifier cylindriques universelles, extérieures ou intérieures, machines à rectifier sans centres, machines spéciales.

9.2.1. Les machines à rectifier les surfaces planes. — Elles utilisent deux procédés : la meule tangente ou la meule type boisseau.

DÉSIGNATION D'UNE MEULE

CARACTÉRISTIQUES

DIMENSIONS EN MILLIMÈTRES

350 × 40 × 31,7

DIAM. ÉPAISSEUR ALÉSAGE

SPÉCIFICATIONS

38A 46 - K 5 VBE

GRADE

D	I	N	S	X
E	J	O	T	Y
F	K	P	U	Z
G	L	Q	V	
H	M	R	W	

NATURE DE L'ABRASIF

Symbole Norton	Symbole universel	Marque Norton	Nature
Néant	A	Alundum régulier	Corindon ordinaire
19	A	— 19	— spécial
57	A	— 57	— spécial
38	A	— 38	— supérieur
32	A	— 32	— —
37	C	Crystolon 37	Carbure de Si noir
39	C	— 39	— vert
»	D	»	Diamant

AGGLOMÉRANT

Symbole universel	Nature	Symbole Norton complémentaire facultatif
V	Vitrifié	BA, BE, P
B	Résinoïde	H, 5, 7, P
S	Silicate	V
R	Rubber *	F
E	Shellac	V
M	Métallique	»

* caoutchouc

GROSSEUR DE GRAIN

Très gros	Gros	Moyen	Fin	Très fin	Poudres
6	12	30	90	220	400
8	14	36	100	240	500
10	16	* 364	120	280	600
»	20	46	50	320	»
»	24	** 54	80	»	»
»	»	60	»	»	»
»	»	70	»	»	»
»	»	80	»	»	»

* Anciennement n° 40
** Anciennement n° 50

(FACULTATIVE)

STRUCTURE

Grains très tassés	Espacement de grains moyen	Grains très écartés	
0	4	7	10
1	5	8	11
2	6	9	12
3	»	»	»

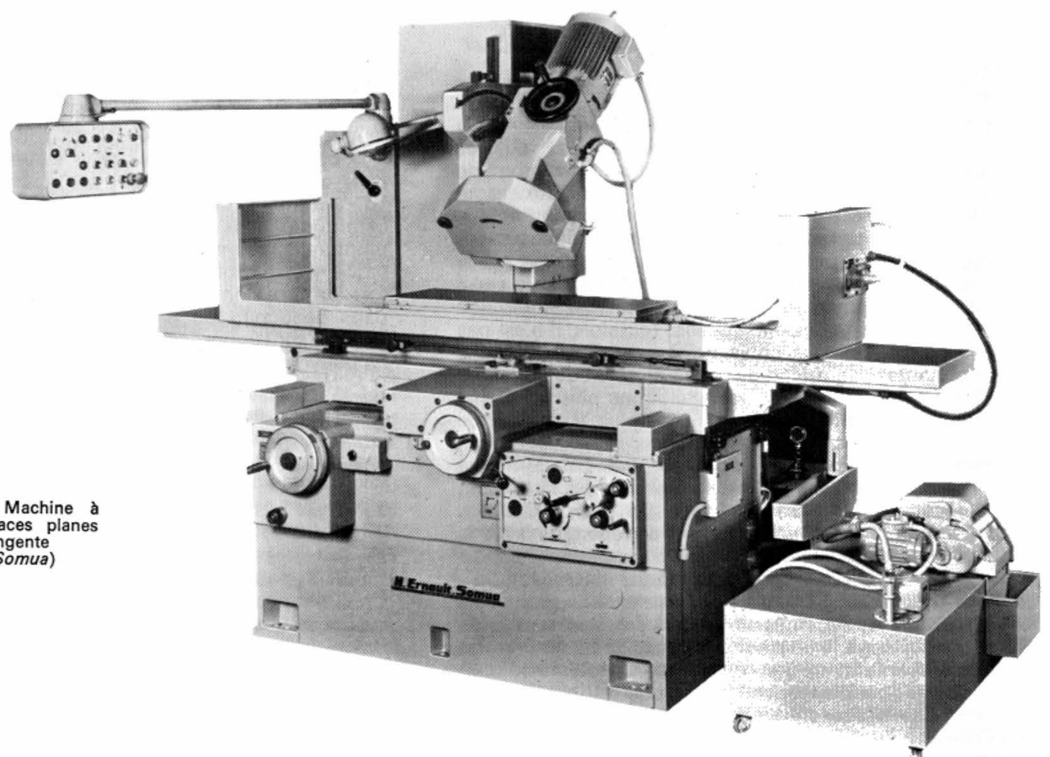


Fig. III-47 — Machine à rectifier les surfaces planes à meule tangente (*Ernault — Somua*)

Dans le premier cas (fig. III-47), la pièce est fixée sur une table, la surface à rectifier étant la partie supérieure ; la table avance sous une meule cylindrique dont l'axe est parallèle à la surface à rectifier. La meule rectifie ainsi sur toutes les longueurs de ses génératrices.

Dans le deuxième cas, l'axe de la meule est vertical (fig. III-48) ; celle-ci rectifie sur toute la largeur de sa section droite. Il existe des partisans et des détracteurs de chacune des méthodes. La meule tangente est peut-être d'un réglage plus facile car la partie en contact avec la pièce est relativement réduite alors que la surface de la meule boisseau est importante et qu'un très faible déréglage risque d'avoir des répercussions graves sur la qualité de la rectification.

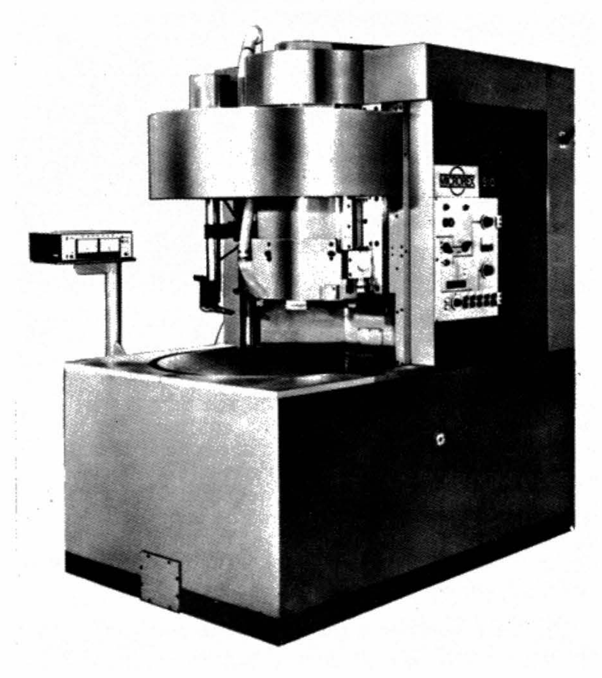


Fig. III-48 — Machine à rectifier les surfaces planes avec meule à axe vertical (*Microrex*)

En revanche, le travail de la meule boisseau est beaucoup plus efficace car il s'effectue au moyen d'une surface beaucoup plus grande. Pour tenir compte des inconvénients de ces deux procédés, les machines sont munies de dispositifs particuliers dont les plus importants sont les suivants :

— Arrêt automatique de l'avance de la meule en plongée aussitôt que la pièce est à la cote.

— Compensation automatique de l'usure de la meule afin que les pièces restent toujours à la cote, même si la meule présente une usure importantes.

On trouve surtout, actuellement, des machines à rectifier planes à meules tangentes à moins qu'il ne s'agisse de surfaces très importantes à rectifier.

9.2.2. Les machines à rectifier cylindriques. — Elles peuvent être universelles, c'est-à-dire aptes à exécuter des rectifications de diamètres extérieurs et intérieurs, cette dernière opération étant effectuée à l'aide d'une broche spéciale. Elles peuvent être aussi plus simples et utilisables seulement pour l'une des opérations : rectification intérieure ou rectification extérieure.

Ces machines ont une allure générale qui rappelle celle des tours (fig. III-49) : bâti robuste avec glissières ; elles sont protégées spécialement contre la poussière d'abrasifs au moyen de protecteurs spéciaux en forme de soufflets qui accompagnent les mouvements de la table. Sur ces glissières se trouve une table qui peut se déplacer longitudinalement ; cette table porte une deuxième table sur laquelle se trouvent la poupée fixe (en ce sens qu'elle est fixe sur la table) et la poupée mobile dont la position dépend de la longueur de la pièce à rectifier. Cette deuxième table peut pivoter par rapport à la première, de manière à permettre des rectifications autres que cylindriques (en particulier des rectifications de cônes).

La meule est montée dans un chariot porte-meule qui ne peut se déplacer longitudinalement mais peut imprimer à la meule un déplacement transversal. Dans certaines machines, le chariot porte-meule est mobile et la pièce ne peut être déplacée dans le sens longitudinal. Il semble bien que la formule consistant à rendre la pièce mobile soit la plus répandue pour l'instant. La condition la plus importante à satisfaire pour une machine à rectifier étant la précision, de nombreux détails doivent être étudiés pour supprimer tout ce qui peut la limiter. L'un des éléments importants est celui des paliers : les paliers fluides semblent prendre de plus en plus d'importance.

Le contrôle de la précision doit être effectué le plus souvent possible, ce qui conduit à la mise en œuvre de dispositifs permanents de vérification. On se sert, à cet effet, d'appareils munis de palpeurs qui sont mis en place sur la pièce et qui donnent en permanence la cote atteinte ; en général, ces appareils sont reliés à des dispositifs qui déclenchent l'arrêt de la machine aussitôt que la cote voulue est atteinte. Par ailleurs on utilise des butées très sensibles, en général des butées micrométriques, pour limiter la course longitudinale du chariot et la course transversale de la meule.

L'une des précautions les plus importantes consiste à vérifier l'usure de la meule ; en effet, celle-ci est altérée par le travail et doit être réaffûtée soit périodiquement, soit après chaque cause d'altération. Il est évidemment très

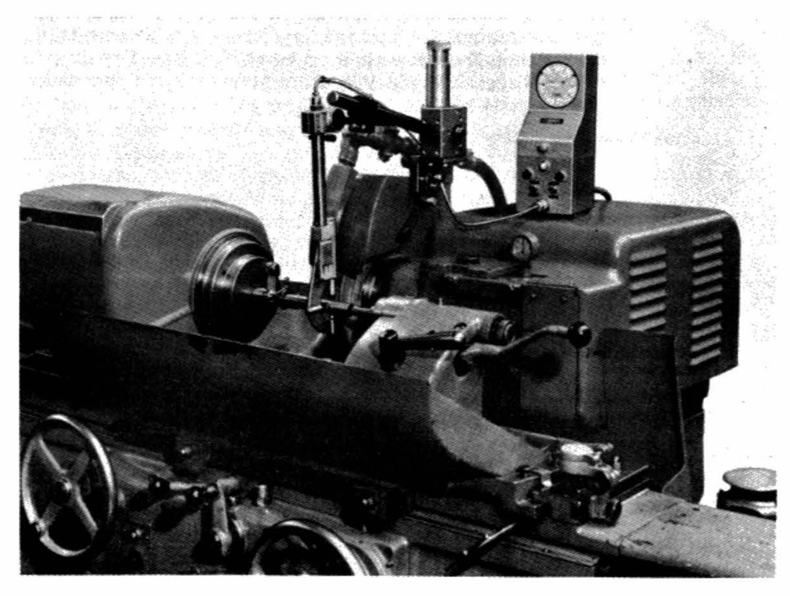


Fig. III-49

Machine à rectifier universelle avec calibrage automatique (*Landis — Gendron*)

important de procéder à un réaffûtage au cours d'une opération afin d'éviter l'arrêt de la machine, les démontages et les remontages de la meule; même si l'on utilise un système d'affûtage évitant tout démontage, on peut toujours craindre qu'un déréglage se produise. Le réaffûtage a pour objet de faire ressortir la partie coupante des grains d'abrasifs ou, au contraire, de la réduire si c'est le liant qui est le plus usé. Divers procédés sont utilisés pour l'affûtage des meules; on se sert volontiers de meules dont les parois sont constituées par de la poussière d'abrasif ou même de diamant car il serait très difficile d'utiliser les méthodes d'affûtage habituelles, c'est-à-dire des meules normales; on emploie aussi des procédés plus modernes tels que l'électroérosion ou l'usinage chimique, procédés applicables seulement avec des outils en métaux ferreux.

9.2.3. Les machines à rectifier intérieures. — Elles ne se distinguent des autres que par la position de la broche porte-meule qui se trouve en porte-à-faux par rapport au chariot porte-broche; cette position interdit évidemment des travaux très durs. De tels porte-broches peuvent être montés sur les chariots des machines à rectifier universelles. Lorsqu'on dispose de machines spéciales à rectifier intérieurement, le montage des broches ne pose pas de problème. La rectification intérieure est rendue difficile par rapport à la rectification extérieure par le fait que les meules ont inévitablement des diamètres faibles et que, pour pouvoir usiner à la vitesse de rectification nécessaire, elles doivent tourner à une très grande vitesse. Cette considération a été la cause de difficultés, il y a quelques années encore, mais actuellement la rotation rapide des broches s'obtient assez aisément.

Le contrôle des diamètres intérieurs des pièces rectifiées est d'autant plus important qu'il n'est pas possible de constater une erreur à l'œil nu; de nombreux appareils ont donc été imaginés pour permettre des contrôles rapides; ils sont, en général, basés sur l'emploi de palpeurs à trois pointes que l'on oriente de manière à les placer sur une même section droite et que l'on déplace sur toute la longueur de la pièce. Dans l'industrie automobile, où le rendement prime tout, on utilise des appareils qui pénètrent automatiquement dans les pièces et permettent même, par des dispositifs spéciaux, de faire varier la vitesse de meulage, par exemple de la réduire vers la fin de l'opération. Ces appareils sont très commodes mais leur précision est, malgré tout, limitée; il est même très difficile d'atteindre une précision de $\pm$ 0,02 mm. Il en est ainsi, d'ailleurs, pour tous les appareils de contrôle fonctionnant en cours d'usinage, pour des raisons faciles à comprendre: vibrations même légères, traces d'huile ou de poussières, etc.

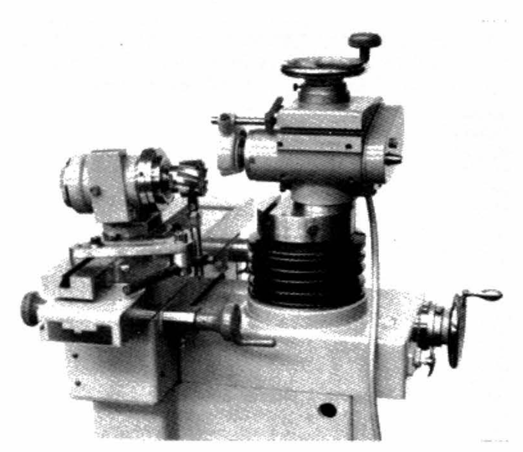


Fig. III-50 — Affûtage de la face de dépouille d'une fraise en bout (*P. Delorme — Forges de Vulcain*)

9.3. Les machines à affûter. — Les machines à rectifier peuvent être adaptées à des travaux particuliers aussi variés qu'on peut le désirer. Les machines à affûter sont caractérisées par le support de l'outil dont on désire affûter les arêtes. Elles se composent d'une colonne portant la broche porte-meule et d'une table sur laquelle est fixé l'outil. S'il s'agit d'outils à une seule arête, le travail est relativement simple; il comprend simplement l'affûtage de l'arête et la rectification de la dépouille. Si l'outil est à arêtes multiples, comme les fraises, et si celles-ci ont une forme hélicoïdale, la meule doit avoir un profil correspondant à cette forme et doit pouvoir affûter de telle sorte que toutes les arêtes aient les points d'une même section droite équidistants de l'axe (fig. III-50).

9.4. Les machines à rectifier les filets de vis. — Elles se sont révélées nécessaires pour réaliser des filetages de haute précision sur des pièces ayant subi des déformations à la trempe. Dans ce cas, il est presque impossible d'opérer une correction à l'aide d'outils nouveaux. De plus, la rectification donne aux flancs de filet un poli aussi poussé qu'on le désire. Ces deux considérations ont été la cause de l'essor de telles machines dans l'industrie.

Une machine à rectifier les filets a l'allure générale d'un tour dans lequel l'outil serait remplacé par une meule; celle-ci peut être simple et rectifier un seul flanc de filet, mais elle peut aussi rectifier les deux flancs voisins, surtout lorsqu'il s'agit du travail d'ébauche. Pour l'ébauche, on préfère cependant, des meules de forme à filets multiples qui permettent d'avancer très notablement le travail; elles présentent un inconvénient: il est difficile d'affûter régulièrement l'ensemble du profil. L'affûtage de ces meules se fait soit avec des outils en diamant, soit avec des meules diamant, c'est-à-dire recouvertes d'une couche de poussière de diamant. L'automatisation du travail est généralement poussée aussi loin que possible, depuis le début du travail jusqu'à la finition. Comme appareil de contrôle on se sert souvent d'un dispositif optique portant un profil type que l'on compare de temps en temps au profil du filetage en cours d'élaboration.

9.5. Les machines à rectifier sans centres. — Elles ont été utilisées pour rectifier des axes cylindriques sur lesquels le traçage de centres aurait constitué une opération inutilement coûteuse (fig. III-51). Pour supprimer les centres, maintenir les pièces à leur position et les faire avancer régulièrement, les constructeurs ont eu l'idée d'utiliser deux meules de grand diamètre, l'une ayant son axe rigoureusement horizontal, l'autre ayant son axe légèrement incliné. La première meule exécute le travail de rectification et la deuxième meule provoque l'avancement de la pièce. Le serrage exercé sur la pièce doit être réglé exactement pour éviter des arrêts dans l'avance de la pièce ou, au contraire, un déplacement trop rapide. En théorie, un axe ainsi rectifié n'est pas cylindrique en raison de la position des meules; dans la pratique étant donné l'épaisseur relativement faible des meules, il semble qu'il ne se produit pas d'erreurs de formes excessives. En vue de supprimer une autre cause

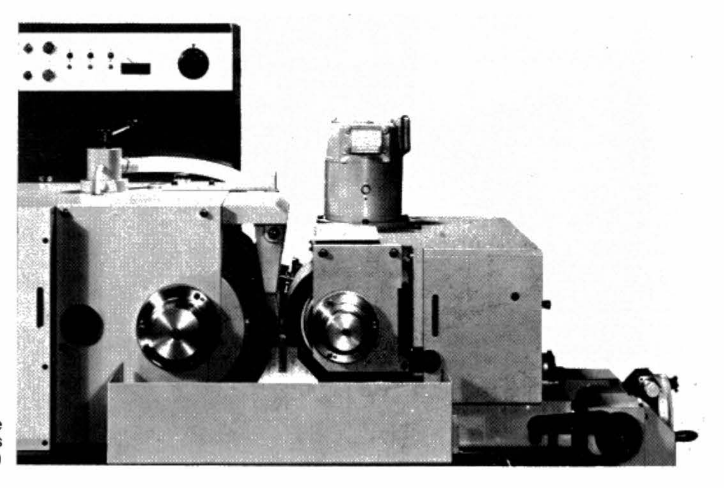


Fig. III-51 — Machine à rectifier sans centres (*Microrex*)

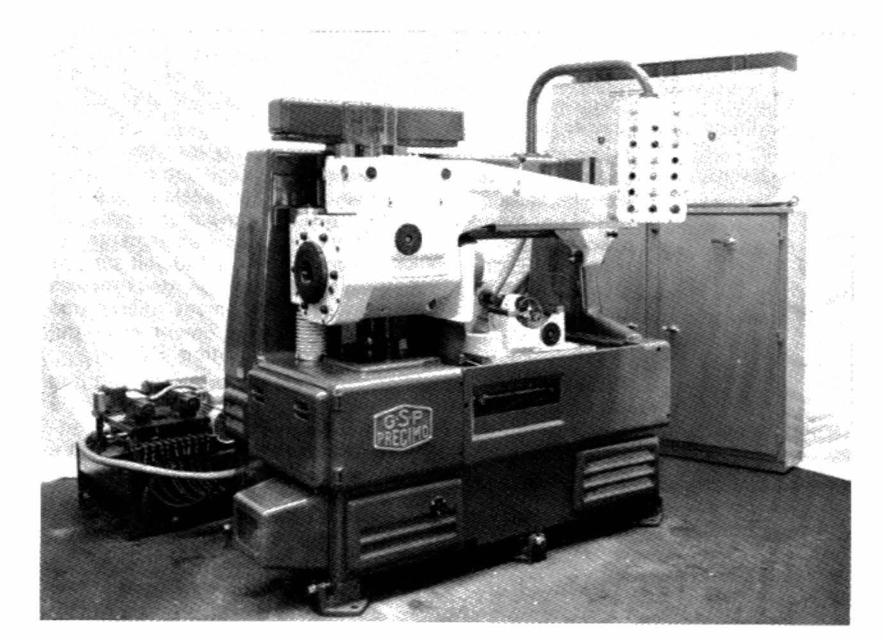


Fig. III-52

Machine à tailler les engrenages par fraise mère (*G.S.P.*)

d'erreurs due à ce que la pièce pourrait descendre trop bas entre les meules, les constructeurs disposent entre elles, une réglette support à la hauteur voulue.

Deux procédés sont employés pour rectifier sans centres : procédé à l'enfilade et procédé en plongée. Dans le procédé à l'enfilade, les pièces doivent être identiques ; elles pénètrent entre les deux meules d'un même côté et sortent du côté opposé. Un couloir d'alimentation amène les pièces de telle manière qu'elles se suivent sans interruption, ce qui impose de régler exactement la vitesse de passage de chaque pièce. Ce procédé est très avantageux en ce qui concerne le rendement mais ne peut s'appliquer qu'à des pièces en forme de cylindres de révolution. Dans le procédé en plongée, en général, les pièces n'ont pas une forme cylindrique de bout en bout ; c'est donc seulement la partie cylindrique qui doit être rectifiée. À cet effet, il faut les présenter individuellement entre les meules et les ramener en arrière aussitôt que la rectification est terminée. Le rendement est donc moindre que dans le procédé à l'enfilade mais les pièces dont il s'agit ne pourraient pas être usinées avec un grand rendement par n'importe quel autre procédé.

10. LES MACHINES À TAILLER LES ENGRENAGES

Ces machines n'ont cessé de prendre de l'importance en raison du développement de l'emploi des engrenages dans l'industrie et, notamment, en automobile. Pour résoudre le mieux possible les problèmes posés par l'utilisation des engrenages, il a été nécessaire d'établir des théories très précises et d'exécuter de nombreux essais. En effet, à leur sujet il se pose un problème de rendement et un problème de bruit. L'engrenage est un moyen de transmission de mouvements d'ordre dynamique, car les mouvements à réaliser sont toujours utilisés en vue d'un usinage ou d'un déplacement d'organes. De plus, si les dents ne sont pas exactement aux formes et aux dimensions voulues, les engrenages en prise risquent de provoquer des chocs dont l'importance se traduit par des bruits, signes caractéristiques d'un mauvais fonctionnement. Pour éviter ces inconvénients, il importe d'abord de donner aux dents d'engrenage les formes voulues et, ensuite de réaliser des états de surface tels que toute cause de frottement inutile soit éliminée.

10.1. Théories relatives à la taille des engrenages. — Les théories des engrenages sont trop complexes pour être exposées succinctement ; elles sont basées sur des principes d'ordre cinématique dont les applications pratiques varient suivant les méthodes d'usinage. On retiendra seulement que les engrenages doivent rouler les uns sur les autres sans frottement au cours de l'engrènement et que l'on doit toujours avoir des dents en prise au cours de la rotation pour éviter des à-coups. Ces conditions déterminent certains profils que l'on s'efforce de réaliser au moyen des procédés suivants : taille par fraise mère ou fraise de forme, taille par reproduction et taille par engrènement.

La taille par fraise mère est exécutée au moyen de fraises à profil constant, ce profil correspondant à l'entredent de l'engrenage à tailler. Il est possible d'effectuer l'usinage correspondant sur des fraiseuses, mais on préfère, en général, se servir de machines spéciales pourvues, notamment, de dispositifs automatiques permettant : la taille proprement dite du creux de dent, le retour de la fraise à sa position primitive, la rotation de la roue portant l'engrenage en vue d'effectuer la taille suivante et la reprise d'un cycle de travail nouveau. Les fraises utilisées sont des fraises à disque si le module n'est pas très grand, mais si le module atteint 20, il est préférable de prendre des fraises en bout dont la section longitudinale est identique au profil du creux de dent ; de telles fraises permettent également la taille d'engrenages en chevrons. Le procédé par fraise mère convient à la taille d'engrenages droits ; il est moins indiqué pour la taille d'engrenages hélicoïdaux que l'on obtient plus facilement par reproduction (fig. III-52).

La fraise utilisée pour la taille par fraise mère a la forme d'une vis dont la surface hélicoïdale correspond à celle d'une vis sans fin qui engrénerait avec l'engrenage à tailler (fig. III-53).



Fig. III-53

Fraise mère (*Tallavignes — Deloche*)

La taille par reproduction (ou par génération) consiste à reproduire l'engrenage à partir d'un gabarit qui représente à une échelle plus ou moins grande le profil à obtenir. On utilise un outil analogue à ceux dont on se sert pour le rabotage ; il est porté par un chariot qui se déplace parallèlement à l'axe de l'engrenage à tailler. L'outil décrit une courbe identique à celle du profil à tailler en étant guidé par un gabarit.

La taille par engrènement est basée sur un principe

différent : tous les engrenages à développante de cercle qui engrènent avec le même pignon ou la même crémaillère, engrènent entre eux.

Dans la taille par engrènement, l'outil peut être un outil crémaillère ou un outil pignon. Dans le premier cas l'outil est une crémaillère à flancs droits (fig. III-54) qui se déplace dans un plan parallèle à l'axe de la pièce. En même temps,

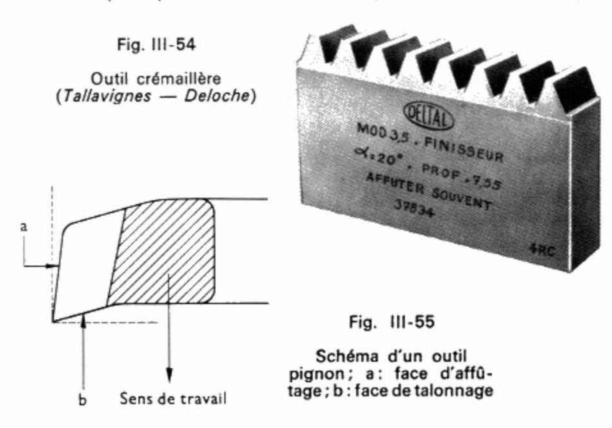


Fig. III-54

Outil crémaillère
(*Tallavignes — Deloche*)

Fig. III-55

Schéma d'un outil pignon ; a : face d'affûtage ; b : face de talonnage

et à chaque passe, l'engrenage reçoit deux mouvements conjugués de rotation et de translation, ce qui permet de réaliser le mouvement de génération (cas des machines Maag). Dans la machine Sunderland, la rotation de l'engrenage est conjuguée avec celle de l'outil et non avec la sienne propre. Lorsqu'on utilise un outil pignon (fig. III-55), on dispose d'un outil qui a la forme d'un engrenage ayant une face d'affûtage et une face de détalonnage. Cet outil travaille comme un outil à mortaiser, en déplacement rectiligne alternatif, l'engrènement étant obtenu par rotation conjuguée de l'outil et de l'engrenage à tailler. On peut ainsi tailler des engrenages cylindriques extérieurs et intérieurs droits (Fellows) ainsi que des engrenages coniques (Reinecker et Gleason).

Par ailleurs, on peut exécuter des tailles d'engrenages au moyen de machines à alimentation automatique comme le montre la figure III-56.

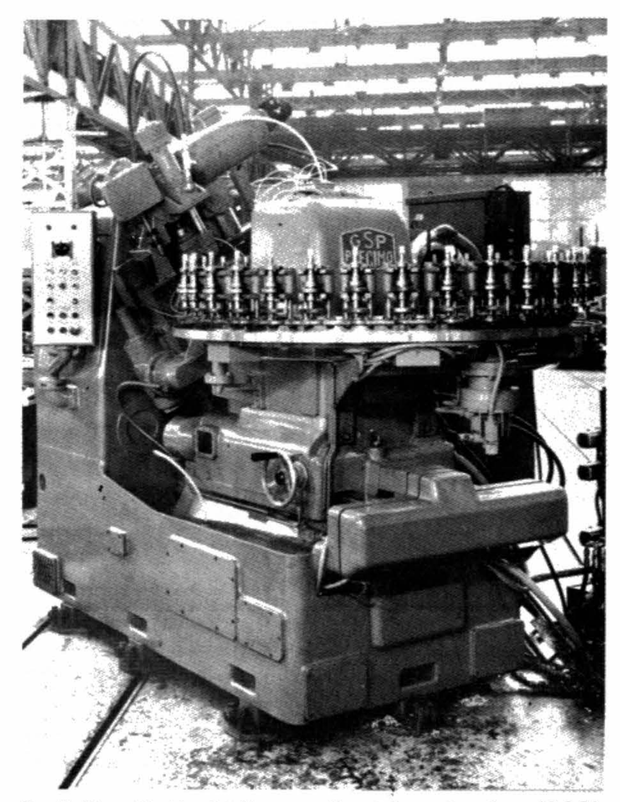


Fig. III-56 — Machine à tailler avec alimentation automatique (*G.S.P.*)

10.2. Rectification des engrenages. — Elle a pour objet de faire disparaître les défauts de surface. Les machines nécessaires à ces opérations sont des machines à rectifier spéciales qui utilisent deux techniques : la génération ou les meules de forme.

Les machines à rectifier par génération sont basées sur une conjugaison de mouvements de translation et de rotation. La roue d'engrenage se déplace parallèlement à son axe d'un mouvement alternatif de translation conjugué avec une rotation. La résultante de ces mouvements est telle que l'engrenage se déplace comme s'il roulait sur une crémaillère dont une dent est matérialisée par deux meules « assiette » (fig. III-57). On peut également utiliser une seule meule dont les profils sont exactement ceux qui matérialisent les deux meules de la solution (Maag).

Les machines à rectifier par meule de forme utilisent une meule dont le profil est exactement celui de l'engrenage à rectifier. On peut rectifier un seul profil puis retourner l'engrenage et répéter exactement les opérations pour l'autre profil. On peut aussi utiliser une meule reproduisant le profil de l'entre-dent ; dans ce cas, une seule opération suffit.

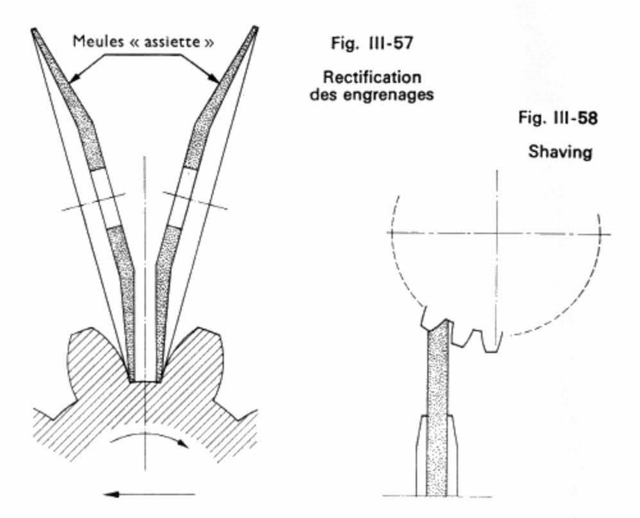


Fig. III-57

Rectification des engrenages

Fig. III-58

Shaving

10.3. Le shaving. — C'est une opération intermédiaire entre l'usinage proprement dit et la rectification ; elle a pour but d'éviter les inconvénients de la rectification, à savoir l'altération superficielle de la matière première. À cet effet on utilise un pignon à denture hélicoïdale de grande précision et qui comporte un grand nombre de saignées exécutées sur chaque dent, parallèlement au profil (fig. III-58). L'engrenage qui doit recevoir ce genre de finition est monté entre pointes et entraîné à grande vitesse par le pignon qui appuie fortement sur lui et dont l'axe est légèrement incliné par rapport à celui de l'engrenage. La conséquence de ce montage est que le pignon exerce un effet de frottement par glissement sur les flancs de l'engrenage. Le résultat est un brunissage qui n'est pas, par conséquent, un enlèvement de matière, mais plutôt une déformation superficielle de celle-ci. On ne peut donc réaliser cette opération que sur des aciers dont la résistance à la rupture est inférieure à 100 daN/mm², ce qui impose presque toujours un traitement thermique. Par conséquent, pour que le procédé soit intéressant, il faut que ce traitement thermique n'apporte pas de déformation notable à la pièce.

11. LES MACHINES À RODER

Malgré tous les progrès accomplis dans la fabrication des meules, la rectification laisse parfois des traces que l'on ne peut laisser subsister. Il est admis que certaines irrégularités sont parfois nécessaires pour que la lubrification puisse jouer son rôle dans le contact de pièces très précises, à savoir la possibilité de séparer les surfaces en contact sans les altérer (ce qui est le cas, par exemple, des cales à bouts plans). C'est donc assez rarement qu'on a besoin d'un poli absolument spéculaire dans l'industrie.

De ce fait, le rodage doit être envisagé comme un intermédiaire entre le poli parfait et la rectification.

Le principe du rodage consiste à réaliser un frottement entre la surface à roder et un outil appelé rodoir qui est le support d'un abrasif déterminé avec interposition d'un liquide déterminé (fig. III-59). La pièce et le rodoir sont animés l'un par rapport à l'autre de mouvements de rotation et de translation destinés à obtenir que toutes les parties de la pièce soient en contact avec le rodoir et, si possible, pendant le même temps.

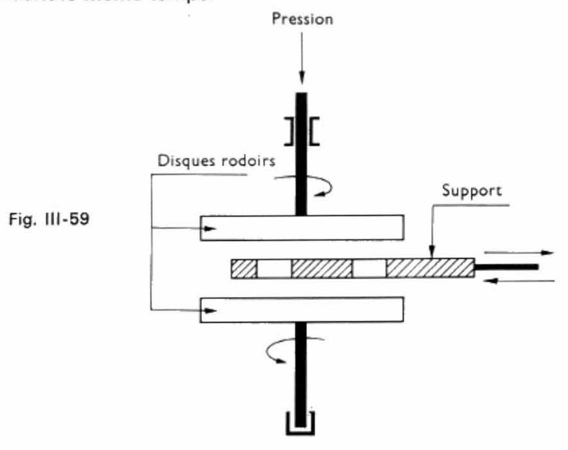


Fig. III-59

Les machines sont, en général, automatiques. Le rodoir est composé soit d'un disque, soit de deux disques tournant à des vitesses différentes. Le disque est en plomb, aluminium, cuivre ou fonte et l'abrasif utilisé peut être du kaolin, de l'alumine ou du sesqui-oxyde de chrome, cet abrasif étant mélangé à un liquide, eau ou pétrole. On peut parfois utiliser des pierres à abraser montées dans les disques, surtout lorsqu'il s'agit de rodages de cylindres intérieurs ; les pierres sont, en général, longues par rapport au diamètre des cylindres intérieurs (3 ou 4 fois ce diamètre). Les vitesses de rodage peuvent atteindre 30 millimètres par minute et les changements de direction sont très fréquents (jusqu'à 100 par minute) ; la pression des rodoirs est de 80 à 100 bars. L'épaisseur enlevée varie de 2 à 5 micromètres par minute avec une élévation de température de 10 à 20 °C. La précision obtenue peut atteindre 2 micromètres.

12. LES MACHINES À BROCHER

Le brochage, né aux États-Unis d'Amérique à l'occasion de fabrications de guerre (alésage et rayage de canons de fusils) est entré dans l'industrie sous l'influence du Canadien Lapointe. Il a donné lieu à de très grands espoirs, en vue du fraisage et de l'alésage, mais il ne semble pas que son développement ait été et doive être aussi grand qu'on pouvait le penser ; la raison est à chercher dans la complexité et le prix des outillages utilisés qu'on appelle broches. Le principe du brochage consiste à tirer ou à pousser la broche, qui est un outil composé de plusieurs dents élémentaires dont la saillie par rapport à l'axe de la broche va croissant. Si l'on prend le cas le plus simple du brochage en tirant, ce sont les dents restant en prise le plus tard qui sont les plus proéminentes. En fait, dans le cas des alésages, les dents des premières sections correspondent au diamètre brut, celles des dernières sections au diamètre final, les toutes dernières dents servant au calibrage.

La traction est exercée par une vis ou mieux par un dispositif hydraulique. Les machines à brocher horizontales sont plus encombrantes mais permettent un travail très précis (fig. III-60). Les machines à brocher verticales (fig. III-61),

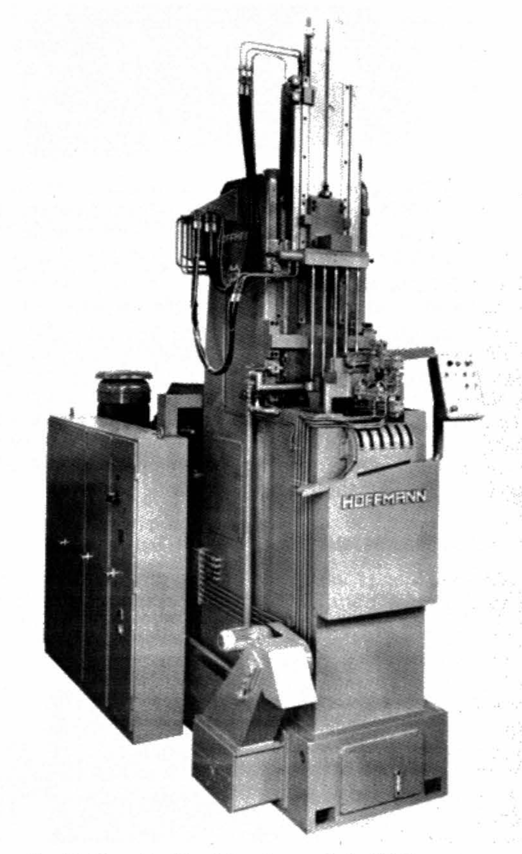
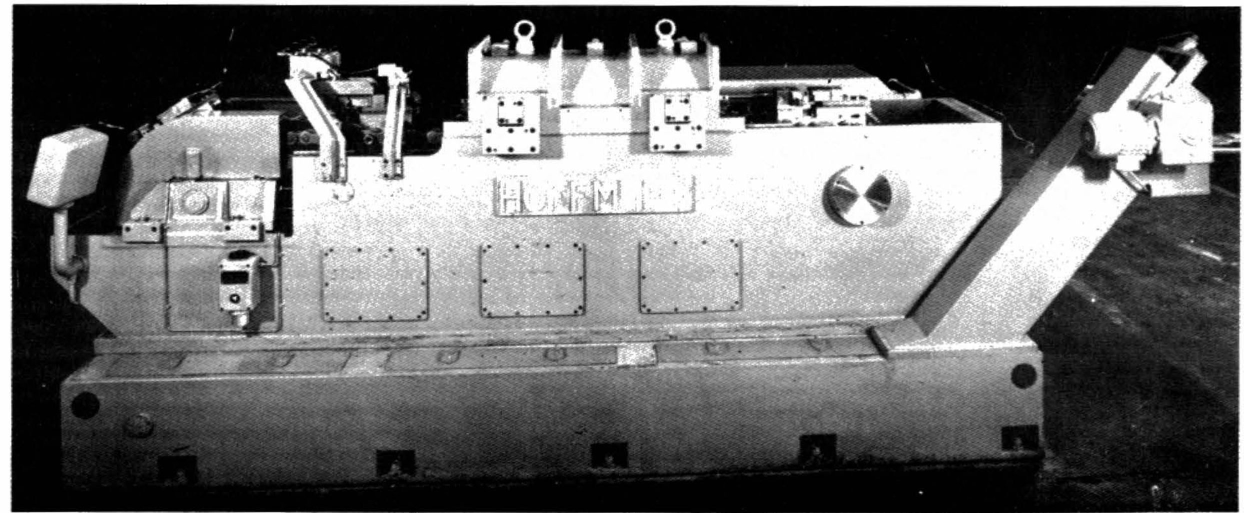


Fig. III-61 — Machine à brocher verticale (*Hoffmann*)



Fig. III-60 — Machine à brocher horizontale (*Hoffmann*)



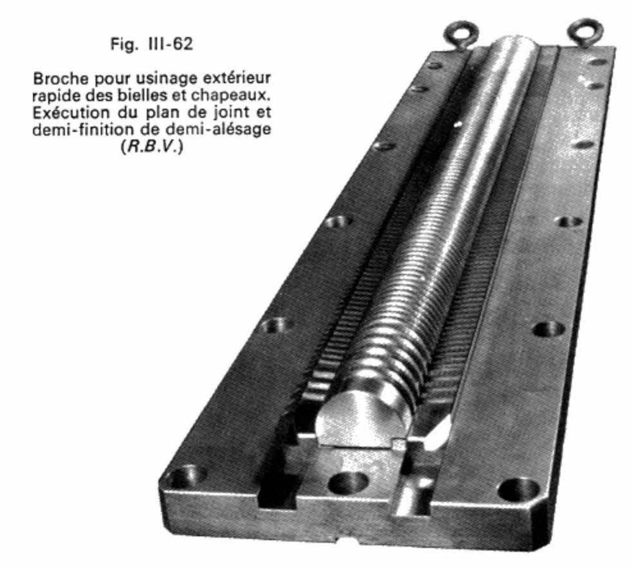


Fig. III-62

Broche pour usinage extérieur rapide des bielles et chapeaux. Exécution du plan de joint et demi-finition de demi-alésage (*R.B.V.*)

utilisées surtout pour le brochage extérieur, ne permettent que des opérations plus réduites. Les efforts de la machine sont comprises entre 3 000 et 30 000 daN, chaque dent enlevant de 0,03 à 0,1 mm.

La technique du brochage n'est pourtant pas en voie de disparition et deux éléments très récents semblent lui conférer un intérêt nouveau, tout au moins dans certaines fabrications: l'emploi des carbures pour les extrémités de dents et l'augmentation de la vitesse du brochage consécutif à cet emploi. Toutefois, ce brochage dit « rapide » est surtout réservé à des fabrications intéressant l'automobile (fig. III-62). Certaines firmes adaptent de plus des dispositifs d'amenage et d'enlèvement de pièces de manière a en augmenter le rendement.

13. LES MACHINES À POINTER

Ces machines représentent un des grands perfectionnements apportés dans l'industrie en matière de précision. En effet, il a été longtemps difficile de marquer avec exactitude, sur des pièces à usiner, des points représentant les axes des trous à percer (les dispositifs de traçage ne donnaient que des approximations). C'est dans l'industrie horlogère que cette nécessité s'est manifestée tout d'abord ; une machine a été mise au point pour marquer les points de perçage et une autre machine a été utilisée pour exécuter les perçages.

Dans les premiers temps, les pointages étaient effectués dans un plan et les deux règles de mesure étaient placées dans un même plan perpendiculairement l'une par rapport à l'autre. Peu à peu, les pointages ont été effectuées sur des pièces ayant toutes les formes possibles. Très vite, il est apparu que des machines aussi coûteuses devaient être utilisées aussi pour l'usinage, et cela d'autant plus que d'autres industries que l'horlogerie ont rapidement compris l'intérêt de ces machines. En effet, il n'est pas un atelier de mécanique appelé à fabriquer des produits de précision qui n'ait d'excellentes raisons de recourir à des machines à pointer.

Quelques années après la première guerre mondiale le pointage des trous était complété par un perçage et même un alésage, en utilisant la même machine. Plus tard, vers 1935, il a été possible d'effectuer également du fraisage, mais on ne pouvait se dissimuler que, toutes les fois qu'une machine à pointer servait pour un usinage, elle engendrait des vibrations et surtout des échauffements nuisibles à la précision. C'est pourquoi la construction s'est modifiée: d'une part, les déplacements de la table sont presque toujours obtenus par action d'un moteur hydraulique dont le fonctionnement est très souple, d'autre part, les déplacements dans le plan horizontal ne sont plus dus à la rotation de vis de très grande précision. En raison du travail de perçage et de fraisage, les mesures s'effectuent désormais au moyen de règles spéciales indépendantes de tout mouvement et de tout effort. De plus, les déplacements dans le plan vertical, qui avaient été négligés jusqu'à présent, commencent à faire l'objet de soins tout particuliers aussi bien en ce qui concerne les vis destinées à ces déplacements, que la lecture des déplacements au moyen de règles.

Plusieurs modèles de machines à pointer ont été construits dans le monde. Il semble, pour l'instant, que les machines d'origine suisse soient considérées comme les meilleures en ce qui concerne la haute précision (fig. III-63). L'industrie japonaise a présenté également quelques modèles dont la qualité paraît excellente.

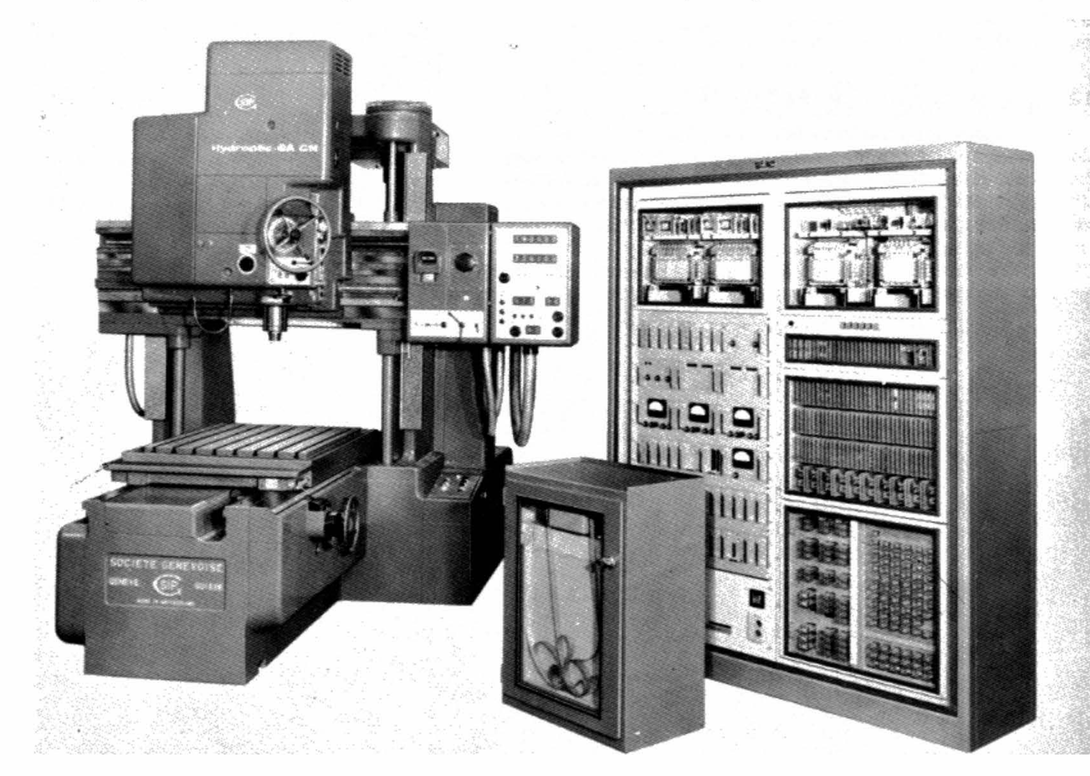


Fig. III-63

Machine à pointer (*Société Genevoise*)

Malgré toutes les améliorations déjà apportées aux machines à pointer, les constructeurs estiment que de nouveaux perfectionnements doivent encore améliorer leur qualité. L'un de leurs désirs est de rendre automatiques certaines corrections telles que celles de température; à cet effet, les bâtis seraient en plusieurs pièces afin que les déformations dues aux dilatations puissent se compenser d'elles-mêmes.

La taille des machines à pointer n'a pas cessé de croître pour dépasser des capacités de table de 1 500 mm × 1 000 mm. Beaucoup de machines sont munies de deux broches pouvant percer, aléser, fraiser, et disposent d'accessoires très variés tels que plateaux circulaires et diviseurs optiques. Grâce à de tels équipements, on peut exécuter des travaux de précision très variés sans montages et sans gabarits. Les précisions atteintes sont de 2 micromètres, sous réserve que les machines soient maintenues à l'abri des vibrations et en atmosphère conditionnée. L'application de la commande numérique facilite grandement l'exécution de travaux continus, qu'il s'agisse de pointages ou d'usinages.

Une telle évolution était nécessaire pour les machines à pointer. En effet, de très nombreuses machines telles que les fraiseuses et les perceuses ont, actuellement, une précision qui leur permet de remplacer les machines à pointer dans certains travaux dont les tolérances restent voisines de 0,05 mm. Les règles de mesure peuvent, par exemple, être remplacées par des assemblages de cales. Cette concurrence a certainement été à la base des nouveaux travaux des constructeurs de machines à pointer pour justifier l'intérêt, indiscutable d'ailleurs, de leur production.

14. LES MACHINES AUXILIAIRES

On citera aussi quelques machines, dites machines auxiliaires, telles que les machines à scier ou à tronçonner dont l'utilisation dans les ateliers est d'une utilité indiscutable. Ces machines ne présentent pas un intérêt particulier, du point de vue purement technique.

CHAPITRE IV

LA COMMANDE NUMÉRIQUE ET LES MACHINES SPÉCIALES

1. LA COMMANDE NUMÉRIQUE

1.1. Principe. — La commande numérique est une technique dont les applications semblent destinées à un développement important en raison des très grands avantages qu'elle apporte, non seulement dans l'usinage proprement dit, mais aussi dans de nombreux autres domaines : métrologie, soudage, etc. (V. t. 2 Automatismes).

En ce qui concerne l'usinage, le but de cette technique est de réaliser la préparation et l'exécution du travail par des procédés tels que l'intervention humaine soit pratiquement supprimée. Les avantages obtenus sont de deux sortes : d'une part, les données relatives à un usinage déterminé sont enregistrées et elles peuvent servir aussi souvent qu'on le désire, d'autre part, des usinages extrêmement difficiles sont réalisables sur des machines-outils, sans avoir recours à un travail manuel. Ces résultats sont atteints grâce au guidage automatique de tous les déplacements relatifs de l'outil — ou des outils — par rapport à la pièce.

La commande numérique a fait son apparition aux États-Unis d'Amérique pendant la dernière guerre mondiale pour l'usinage de pièces de réacteurs si complexes qu'il fallait les usiner à la main auparavant. C'est vers 1960 que le procédé a commencé à entrer dans la pratique courante dans ce pays et, quelques années plus tard, les pays européens, ainsi que le Japon, ont entrepris de développer cette technique dans leurs industries. À l'heure actuelle, la commande numérique, encore en pleine évolution, se répand dans les ateliers mais d'une manière assez lente car son adoption se heurte à des questions de prix et d'habitudes qu'il faut modifier.

L'emploi de la commande numérique représente une véritable « escalade » dans l'usinage. Cette escalade conduit, d'une part, à une suppression presque totale d'ouvriers qualifiés auprès des machines et, d'autre part, à l'intervention, pour préparer les programmes de fabrication, d'un personnel dont la qualification est de plus en plus proche de celle des ingénieurs. Cette constatation montre à quel point les esprits doivent se modifier dans l'avenir en ce qui concerne la compétence professionnelle.

L'exposé du problème de la commande numérique est relativement complexe; on peut, toutefois, le présenter d'une manière assez simple, en considérant qu'il se compose de deux parties :

a) la préparation du travail depuis l'ordre de mise en commande jusqu'au moment où fonctionne la machine, (traitement externe) ;

b) l'exécution du travail qui comprend tout ce qui concerne le fonctionnement de la machine depuis sa mise en marche jusqu'à son arrêt (traitement interne).

Contrairement à certaines opinions, il ne paraît pas possible de séparer ces deux parties qui sont trop intimement mêlées, même si le traitement externe aborde d'autres problèmes que l'usinage lui-même.

1.2. Le traitement externe. — Le traitement externe, autrement dit la préparation du travail, comporte plusieurs phases (V. t. 1, Informatique et t. 2, Automatismes).

Tout d'abord le préparateur doit établir un document comportant tous les éléments de l'usinage à réaliser : désignation de la matière constitutive, données de forme, c'est-à-dire trajectoire que doit suivre l'outil par rapport à la pièce pour lui donner les cotes et les tolérances voulues, données technologiques, c'est-à-dire conditions de la coupe et du travail : vitesses, avances, arrosage, éventuellement changement d'outils. On signalera au passage que les cotes et les tolérances de la pièce ne sont prises en considération que par l'intermédiaire de la trajectoire de l'outil chargé de l'usinage. Cette préparation donne lieu à l'établissement, en langage clair, d'un document qui doit être absolument complet, puisque l'emploi de la commande numérique exclut a priori toute intervention humaine; si, pour une raison quelconque, la commande numérique cesse d'être utilisée au cours de l'usinage, le manuscrit doit le mentionner expressément. L'obligation de prévoir toutes les conditions de l'usinage est une des caractéristiques de l'emploi de la commande numérique; elle a souvent permis, en raison même de sa rigueur, de faire faire à l'usinage des progrès notables.

Une fois le dossier de préparation en langage clair établi, on aborde la phase désignée parfois par le terme *phase de conversation* entre le préparateur, qui prend alors le nom de programmeur, et la machine destinée à l'usinage. Cette phase consiste à transmettre à cette machine les données grâce auxquelles elle usinera sous la direction de la commande numérique. Deux hypothèses se présentent :

— Ou bien l'usinage est simple et le programmeur peut converser directement à la machine; c'est le cas qui se présente en particulier quand la détermination des trajectoires est simple et ne nécessite que peu de calculs; on utilise alors la programmation dite manuelle.

— Ou bien l'usinage est complexe ; en particulier lorsque les calculs de trajectoires sont si nombreux et si compliqués que le programmeur n'arriverait pas à les exécuter en pratique, on est obligé de recourir à un appareil de calcul plus ou moins puissant selon les cas (calculatrice, ordinateur).

Le programmeur doit alors employer un langage spécial. On est amené alors à utiliser la programmation dite automatique.

Dans le deuxième cas, le résultat obtenu sera l'établissement d'un support d'information dont l'introduction dans la machine déclenche l'usinage commandé numériquement. Il s'agit dans la plupart des cas d'une bande perforée dont les caractéristiques seront données plus loin. La programmation manuelle impose, malgré son nom, le recours à une machine à calculer et à une machine à perforer les bandes. Le programmeur grâce à la lecture du document introduit à cet effet ces documents dans un ordinateur qui, par comparaison entre les données qui lui sont ainsi fournies, établit sous forme d'une bande perforée nouvelle le support définitif destiné à être introduit dans la machine. Cette dernière opération s'appelle *post processing*, elle peut s'effectuer soit avec l'ordinateur qui a établi la première bande (fig. IV-2), soit avec un ordinateur spécial placé en général près de la machine (fig. IV-3).

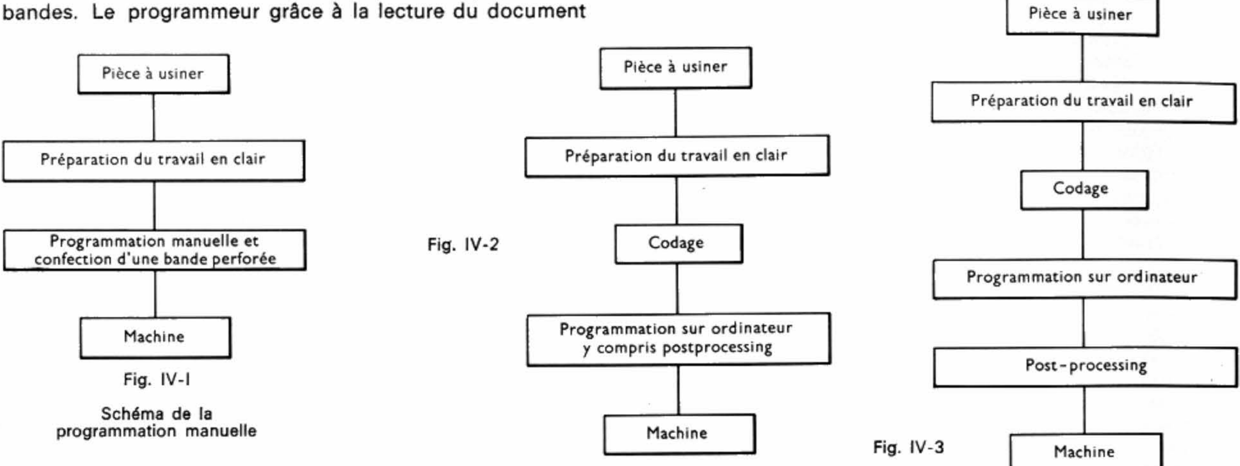


Fig. IV-1

Schéma de la programmation manuelle

Fig. IV-2

Fig. IV-3

de préparation effectue directement les calculs nécessaires puis, à l'aide de l'ensemble de la documentation qu'il possède, établit un bordereau dont la lecture permet de réaliser la perforation de la bande. Dans certains cas, la programmation manuelle peut-être assistée, c'est-à-dire comporter pour certains éléments de calcul, avec une calculatrice simple et un codage simplifié, une forme de programmation automatique très simplifiée. Le schéma ci-après donne une idée de la programmation manuelle (fig. IV-1).

La programmation automatique devient indispensable notamment lorsque les calculs relatifs aux trajectoires atteignent une complexité excessive. Très souvent ces trajectoires ne suivent pas des courbes définies mathématiquement et doivent faire l'objet d'interpolations consistant à les remplacer par des éléments de droites ou de circonférences d'autant plus nombreux que la précision à atteindre est plus grande. Par ailleurs, la trajectoire, une fois définie, doit être repérée par rapport à des axes déterminés, ce qui conduit à effectuer des calculs selon certaines définitions : une droite peut être définie par deux points, ou par un point et l'angle qu'elle fait avec une autre droite ou bien être tangente à deux cercles, etc. De même un cercle peut être défini par son rayon et son centre, son centre et un point, un contact avec deux cercles, etc.

Pour obtenir tous les éléments de calcul, ainsi que pour établir, dans leur suite logique, toutes les opérations nécessaires à l'usinage, il faut établir, à partir du manuscrit rédigé en clair, un manuscrit rédigé dans un langage codé beaucoup plus simple et intelligible pour l'ordinateur. Plusieurs langages ont été établis et leur choix dépend surtout des utilisateurs. Le langage le plus connu est le langage américain A.P.T. qui est très complet et dont on peut extraire des langages plus simples appelés ADAPT, EXAPT, IFAPT, ne nécessitant pas l'emploi d'ordinateurs trop puissants et choisis d'après les préférences des utilisateurs. Le programmeur prépare à partir du manuscrit codé des cartes perforées ou, éventuellement, des bandes perforées qui, introduites dans l'ordinateur, lui permettent de faire les calculs nécessaires et de préparer une bande de sortie dans le langage binaire qui est le sien.

La bande ainsi obtenue est valable pour l'usinage de la pièce mais ne correspond pas obligatoirement aux possibilités de la machine qu'on veut utiliser pour l'usinage, car les vitesses, les avances de celle-ci peuvent différer de celles qui ont servi au calcul précédent. Pour adapter le travail de programmation ainsi effectué à la machine que l'on compte utiliser, on compare la bande obtenue comme il a été indiqué ci-dessus à un paquet de cartes (ou à une autre bande) représentant les données de la machine. On

Les bandes représentent une mémoire permanente de l'usinage qu'elles permettent d'effectuer et peuvent servir à ce titre aussi souvent qu'on le désire. Elles ont une largeur de 25,4 mm et leur présentation est régie soit par un code dit E I A , soit par un code ISO (normalisation internationale). Leurs indications sont lues par des dispositifs spéciaux qui utiliseront, par exemple, des rayons lumineux qui donnent un signal quand passe une perforation et n'en donnent pas dans le cas contraire. Chaque signal est suffisamment amplifié ensuite pour exercer l'action nécessaire sur l'organe intéressé de la machine (moteur, par exemple). L'ensemble du dispositif de lecture et d'amplification est appelé M.C.U. (*Machine control unit*) aux États-Unis d'Amérique.

La réalisation de bandes perforées exemptes de toute indication erronée est une nécessité absolue. C'est pourquoi il importe de les vérifier soigneusement, ce que l'on fait soit avant usinage en préparant une seconde bande que l'on compare avec la première, avec une certitude à peu près absolue qu'on ne commettra pas deux fois la même erreur, soit en usinant une première pièce qu'on vérifiera afin d'examiner si une erreur de perforation s'est ou non produite.

La vitesse de fonctionnement des ordinateurs contraste avec la lenteur de l'établissement des bandes perforées. On a tenté d'utiliser des bandes magnétiques où les indications au lieu d'être obtenues par perforation le sont grâce à des inscriptions magnétiques ; leur vitesse est plus grande mais elles présentent des défauts, parmi lesquels des risques sérieux d'altération.

Ces considérations ont conduit à l'étude de ce qu'on appelle la commande directe, réservée a priori aux cas où de nombreux calculs sont nécessaires. La programmation est alors préparée à l'avance et mise en mémoire sur des disques. Lorsqu'on veut les utiliser, ces disques sont branchés sur des dispositifs interfaces qui jouent le rôle de M. C. U. (voir ci-dessus) de telle sorte qu'aucune bande perforée n'est nécessaire. Dans une version plus élaborée encore, la commande directe est « visualisée », auquel cas, grâce à des claviers spéciaux, on fait apparaître sur un écran cathodique le tracé de la pièce et les éléments principaux de l'usinage. Si, pour une raison quelconque, par exemple, après l'usinage d'une pièce d'essai, il apparaît que les données doivent être corrigées, cette correction s'effectue grâce à un crayon électronique qui pointe l'endroit entaché d'erreur et provoque la correction à l'aide des claviers (fig. IV-4). Dans une extension plus grande encore, on peut envisager, à l'aide d'un grand ordinateur, de conduire directement un nombre de machines aussi élevé théoriquement qu'on peut le désirer.

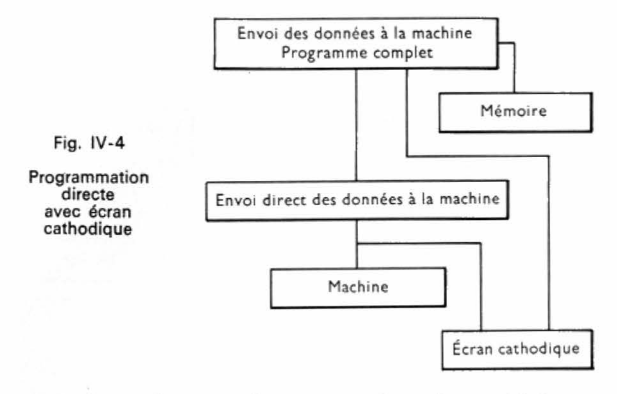


Fig. IV-4

Programmation directe avec écran cathodique

1.3. Le traitement interne. — Le traitement interne, autrement dit le fonctionnement de la machine, doit être examiné sous un double aspect : fonctionnement proprement dit et nature des opérations exécutées.

1.3.1. Le fonctionnement. — Le fonctionnement d'une machine commandée numériquement revient presque toujours à obtenir que le signal déclenché par une bande (bande perforée, bande magnétique) ou une commande directe, et suffisamment amplifié, agisse sur un moteur qui fait tourner une vis et déplace ainsi un organe mobile. Ce déplacement doit correspondre à une valeur déterminée lors de la préparation du travail et qu'on appelle parfois *grandeur de consigne* ; il se peut aussi que, pour des raisons variées, le déplacement réel ne soit pas exactement égal à cette valeur et qu'une correction doive être prévue. Deux cas se présentent :

— Ou bien on admet que les erreurs de fonctionnement sont suffisamment faibles pour qu'elles ne donnent pas lieu à correction ; il suffit que la vis soit très bien fabriquée et que le moteur ait une gamme de rotation très précise. On dit que

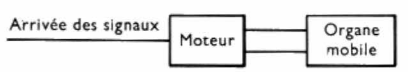


Fig. IV-5 — Schéma de la boucle ouverte

le système est *à boucle ouverte* et il est extrêmement simple comme le montre la figure IV-5. Étant donné les progrès réalisés dans la fabrication des moteurs, ce système est de plus en plus employé ; malgré tout il laisse place à une certaine incertitude.

— Ou bien un dispositif de correction permet d'imprimer à la pièce ou à l'outil le déplacement juste nécessaire. Dans ce cas, ou bien l'organe de contrôle « attend » la pièce en mouvement et la ramène à la position exacte, ou bien il « accompagne » constamment la pièce en mouvement et en corrige sans cesse la position. La figure IV-6 montre comment s'effectue cette correction. Le système est alors dit *en boucle fermée*

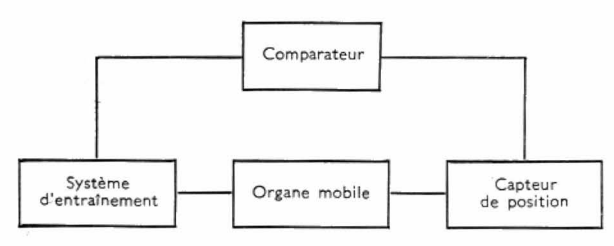


Fig. IV-6 — Scnéma de la boucle fermée

1.3.2. Nature des opérations effectuées. — La nature des opérations est double. L'une d'elles est le *point-à-point* (ou point-par-point) ; elle consiste à amener l'outil d'un point à un autre sans que le chemin à parcourir pour y arriver soit déterminé. Autrement dit, il n'y a pas de coordination de déplacements. On peut rattacher à ce procédé le « paraxial » qui consiste à déplacer l'outil selon des chemins parallèles entre eux, également sans coordination. Le type même de l'opération point-à-point est le perçage de trous sur une surface plane. L'autre opération est le *contournage* (en anglais *contourning*) qui consiste, à coordonner les déplacements de l'outil suivant deux ou plusieurs axes en vue de l'usinage d'une courbe ou d'une surface. La nécessité de cette coordination explique pourquoi ce procédé est plus compliqué que le précédent.

La mise en œuvre de ces deux procédés présente de grandes analogies et quelques différences. Les analogies résident surtout dans les moyens de réaliser les déplacements nécessaires (systèmes analogiques ou numériques) Les différences viennent essentiellement du fait que le point-par-point est une application beaucoup plus simple que le contournage, cette opération étant d'ailleurs de nature à être de plus en plus complexe au fur et à mesure que le nombre de mouvements à coordonner augmente.

1.4. La réalisation matérielle, le point-à-point, le paraxial, le contournage. — On va examiner la réalisation matérielle des mouvements communs aux deux opérations en se plaçant dans le cas de la boucle fermée ; dans le cas d'une boucle ouverte la plupart des montages indiqués ci-après sont inutiles.

Pour prendre un exemple concret, on suppose que la bande perforée utilisée pour la commande de la machine porte l'indication :

y
264
625

Dans ce cas, on dit qu'on utilise une écriture par tableaux ou tabulateur : cette indication signifie que le chariot de la machine doit se déplacer selon l'axe des y (par exemple perpendiculairement à la ligne des pointes) de la cote 264 à la cote 625. Si tout se passait comme prévu aucune correction ne serait nécessaire. Mais il est possible que le chariot se trouve à la cote B (entre 264 et 625) au lieu d'être à la cote A (valeur de consigne). Le signal à transmettre au moteur doit donc dépendre de la différence A-B ; il peut être obtenu en composant des courants électriques représentant A et B (à l'aide d'un comparateur). Pour être utilisable, ce signal doit être suffisamment amplifié, ce que l'on obtient à l'aide d'amplificateurs tournants, comme des rotors de moteurs, ou des amplificateurs à thyristors qui permettent d'amplifier jusqu'à 10 000 fois et même plus. L'action sur le moteur entraîne soit une variation de vitesse, soit un changement de position. Dans les deux cas, on utilise des servomécanismes qui agissent en fonction soit de la vitesse, soit de la position de l'élément mobile.

Il existe deux systèmes permettant de réaliser ces montages : les systèmes analogiques et les systèmes numériques. Les premiers donnent des informations continues, à la manière d'une montre à aiguilles ; les seconds donnent des informations chiffrées et discontinues, à la manière des montres dans lesquelles les heures, les minutes et les secondes apparaissent sur un écran, sans qu'on puisse apprécier les valeurs entre l'apparition de deux groupes de chiffres successifs.

Dans le cas des systèmes analogiques (fig. IV-7), il faut comparer la grandeur de consigne à la grandeur réelle comme on l'a indiqué ci-dessus. La grandeur de consigne

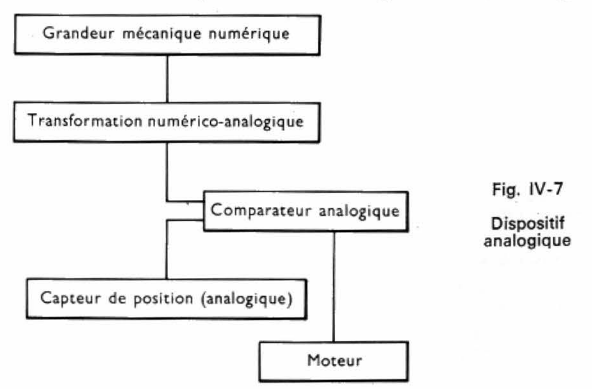


Fig. IV-7

Dispositif analogique

ne pouvant être donnée que sous forme numérique, il faut donc lui donner une forme analogique à l'aide d'un transducteur numérique-analogique. La grandeur réelle est donnée par un capteur de vitesse ou de position, suivant le procédé utilisé. Il existe plusieurs modèles de capteurs ; l'un des plus connus est l'inductosyne (fig. IV-8).

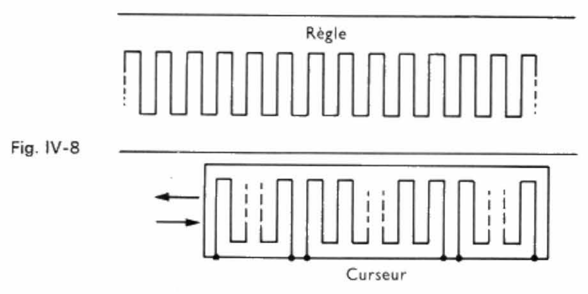


Fig. IV-8

La règle fixée au bâti fixe et le curseur accompagnant la pièce mobile portent des enroulements dont la disposition est analogue à un stator et à un rotor qui auraient été développés et mis à plat. Lorsque le curseur se déplace en face de la règle il se crée des tensions qui s'annulent deux fois pour des positions de la règle et du curseur correspondant à des positions perpendiculaires d'un stator et d'un rotor

Dans le cas de systèmes numériques, il existe deux solutions : les systèmes à codage et les systèmes à comptage.

Dans les systèmes à codage (fig. IV-9) on code les informations sous une forme aussi abrégée que possible et, à cet effet, on utilise volontiers le système de numération binaire. Cette numération convient bien aux formes : tout

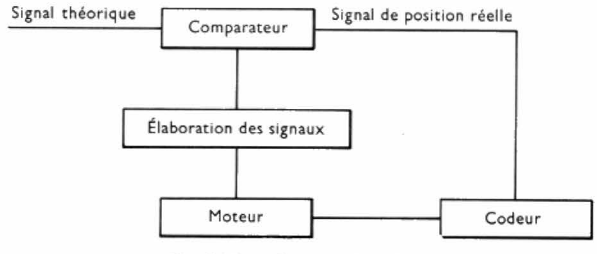


Fig. IV-9 — Système à codage

ou rien, plus ou moins, ouvert ou fermé. Elle se concrétise à l'aide de circuits grâce auxquels on peut réaliser des fonctions de codage permettant la réalisation nécessaire. Par exemple, la fonction ET est définie ainsi qu'il suit :

A	*B*	*F*
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Pour que deux fonctions *A* et *B* puissent se combiner pour donner une fonction *F*, il faut que *A* et *B* soient dans la position 1 (fig. IV-10).

Fig. IV-10

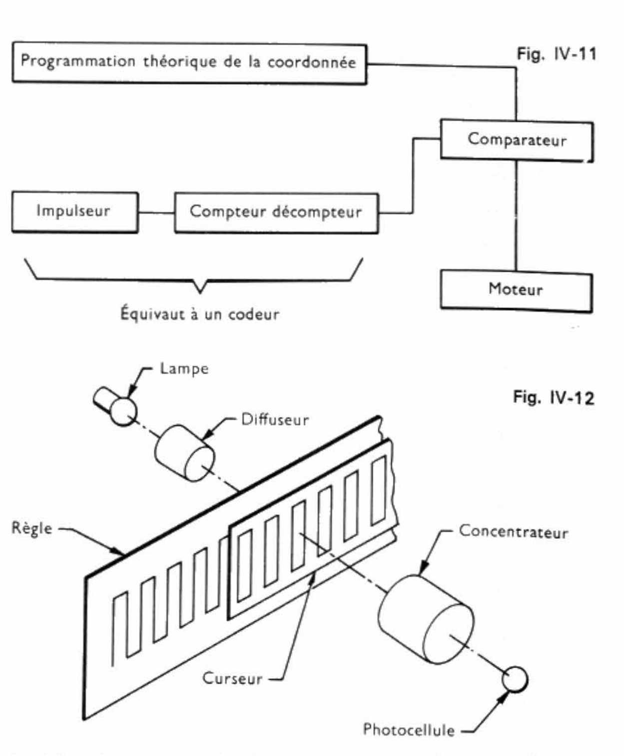
A
B
F
M

Dans le cas précédent :

y
264
625

si la position de consigne est en *A*, entre ces deux chiffres, et la position réelle est en *B*, la résultante *A*-*B*, ou en langage binaire $A + (-B)$, est égale à $264 + A + (-264 - B)$ ou bien à $625 - A + (-625 + B)$.

Dans le système à comptage (fig. IV-11), les déplacements sont indiqués par des impulsions dont la plus petite valeur s'appelle « incrément ». Les impulsions sont engendrées au moyen de règles spéciales telles que la règle Heidenhain (fig. IV-12). Les impulsions correspondant



La règle et le curseur ont des plages transparentes et des plages obscures échelonnées de 1 mm à 0,01 mm. La lumière est arrêtée ou passe suivant la position des plages. Les impulsions sont créées par les passages et les interruptions

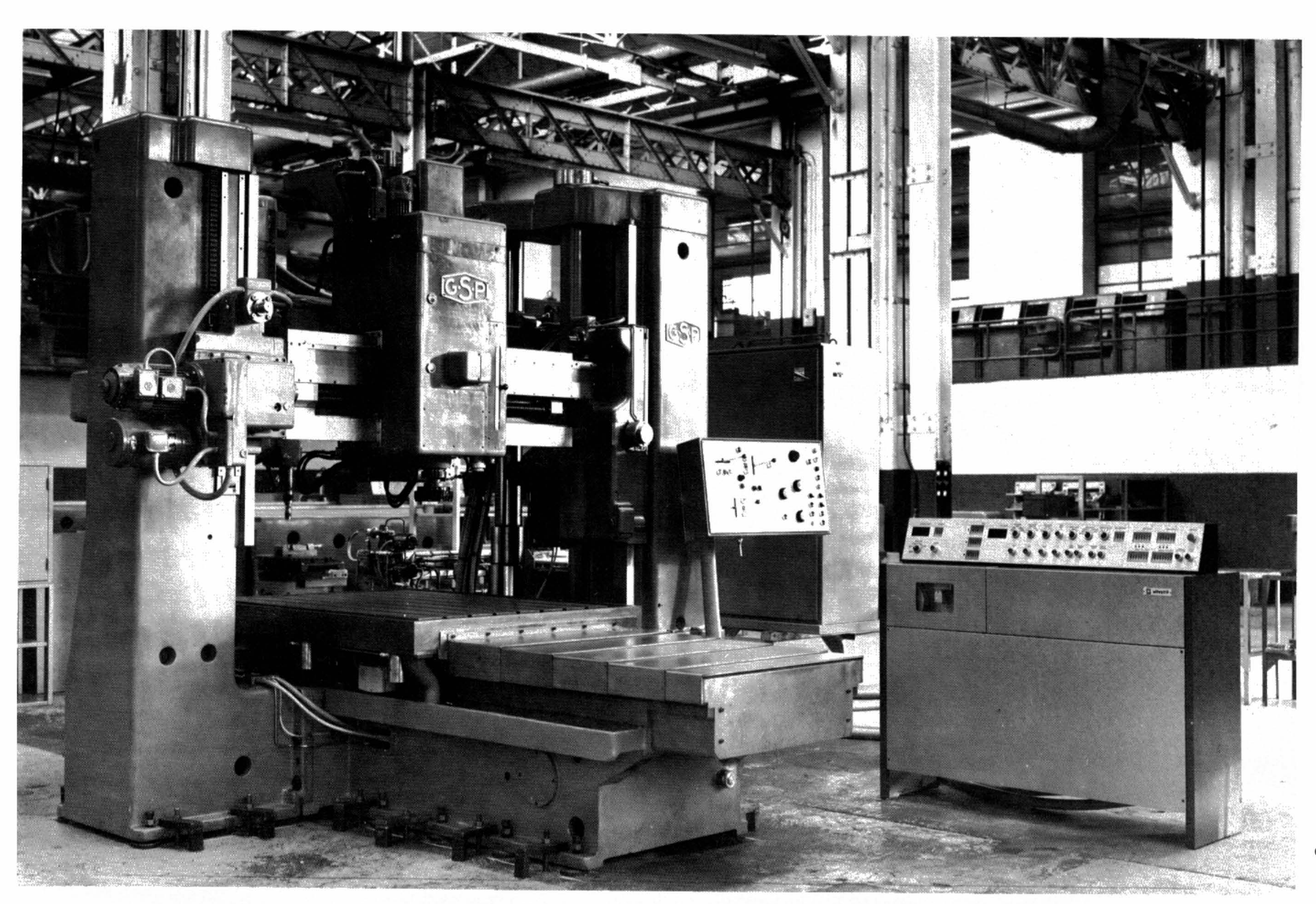
respectivement à la valeur de consigne *A* et à la valeur réelle *B* se retranchent jusqu'au moment où l'on obtient l'égalité $A = B$.

Le système à comptage est, évidemment, de beaucoup le plus simple ; il convient, toutefois, de s'assurer que les impulsions sont parfaitement régulières.

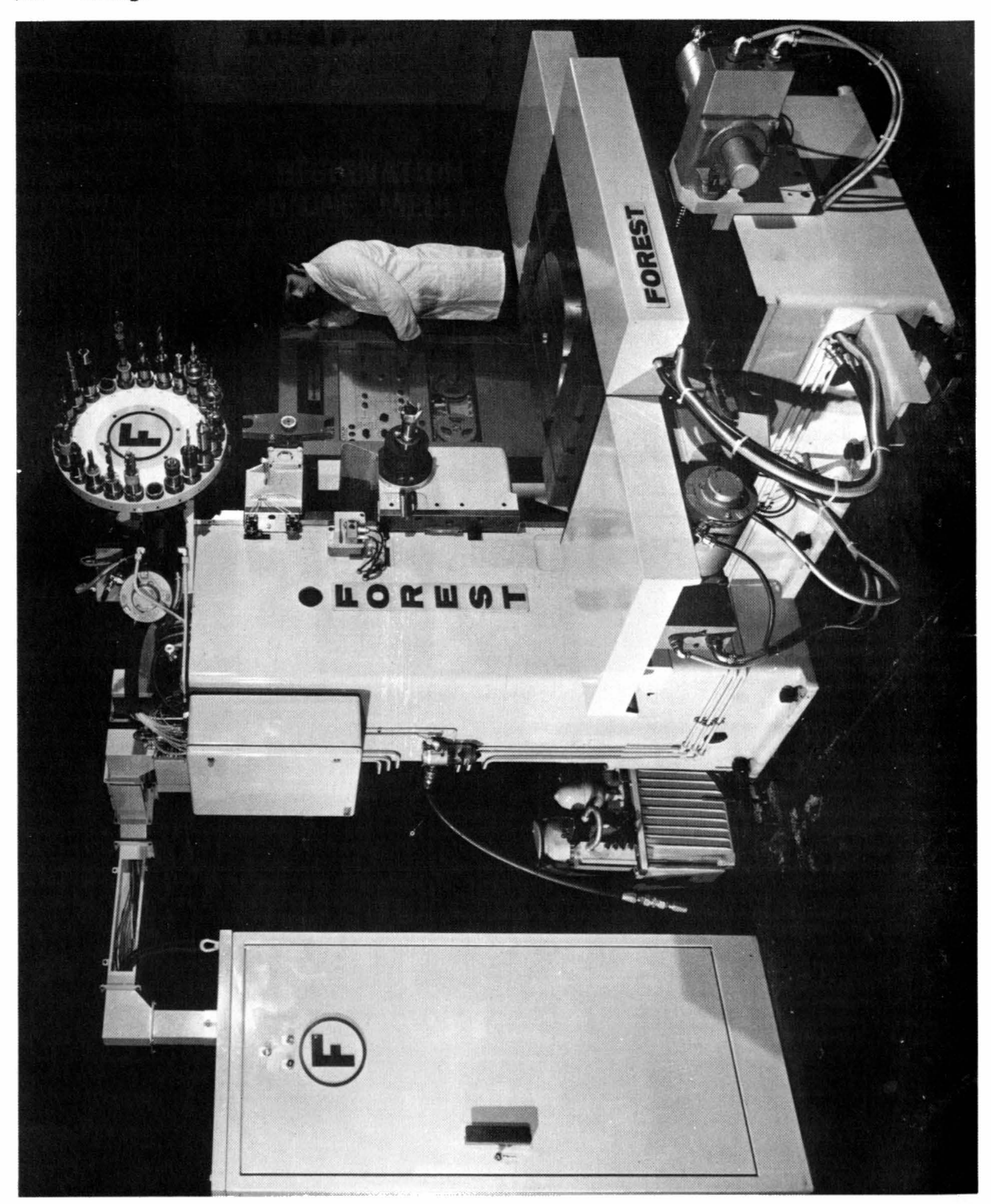
Les développements qui précèdent s'appliquent au point-par-point et au contournage. Ils doivent être complétés dans ce dernier cas par quelques précisions relatives, surtout, à la géométrie des pièces et à la cinématique des mouvements. On a signalé déjà que la pièce à usiner est presque toujours rapportée à des axes dépendant de la machine-outil : ligne des pointes, plan horizontal passant par cette ligne perpendiculaire à ce plan, etc. Ce n'est donc plus la pièce qui est prise en considération mais le trajet de l'outil ; c'est pourquoi le post-processing, peu utile dans le point-par-point, devient indispensable dans le contournage. Quant à la cinématique des mouvements, elle est liée aux déplacements que doit effectuer l'outil par rapport à la pièce ; elle conduit à l'interpolation. Deux cas sont à considérer : ce déplacement a la forme d'une courbe plane ou bien il s'agit d'une courbe gauche ou d'une surface.

Dans ces deux cas, si la courbe ou la surface sont définies mathématiquement avec exactitude, il est facile de donner à l'outil le déplacement correspondant ; par exemple, s'il s'agit d'une parabole, aucune difficulté ne se présente pour prendre les abscisses et les ordonnées de chaque point. S'il n'en est pas ainsi, on doit effectuer une interpolation qui consiste à remplacer les éléments de la courbe par des éléments de droites ou éventuellement des cercles. On est ainsi ramené au cas des courbes d'équations connues. S'il s'agit de surfaces, on considère des sections droites de celles-ci et on traite chacune d'elles comme les courbes planes. Les ordinateurs rendent les plus grands services pour ces interpolations.

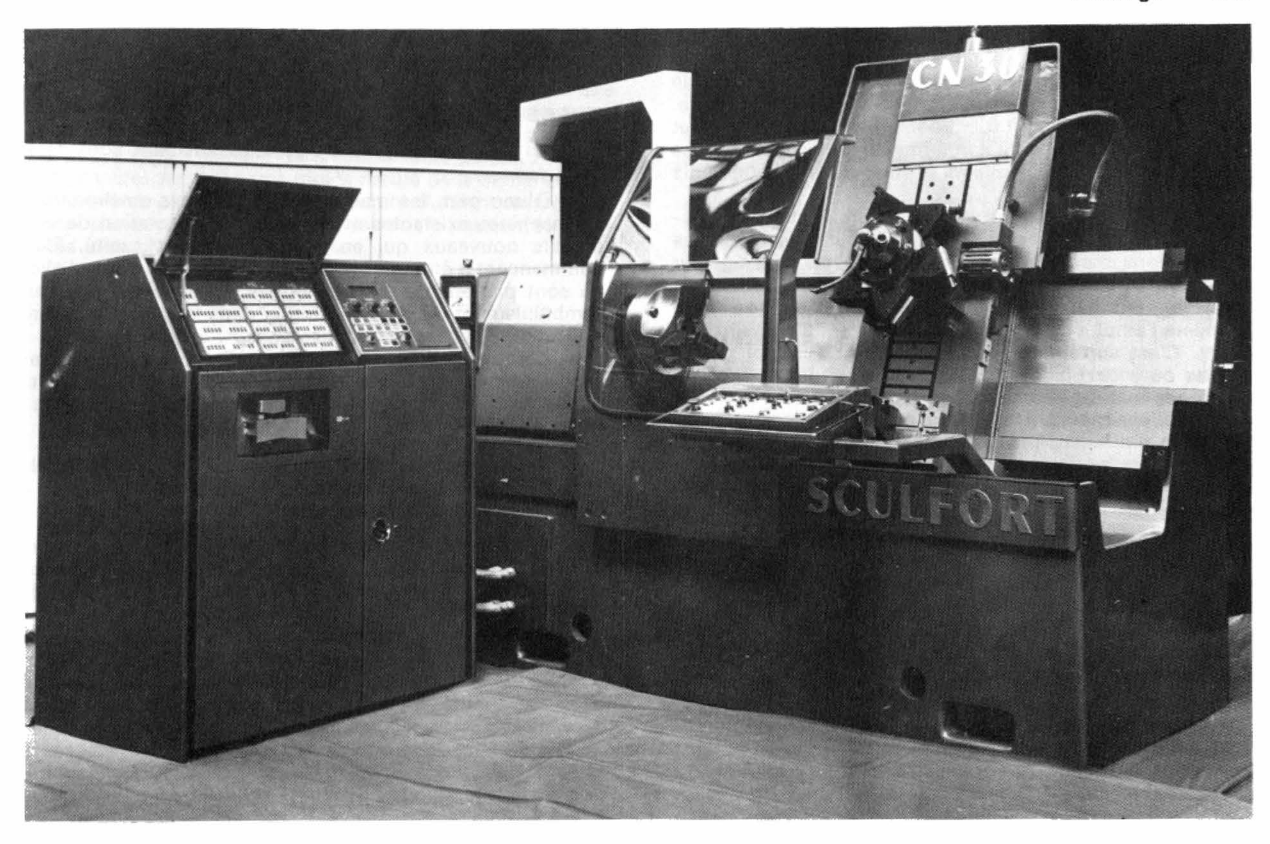
1.5. L'adaptation des machines-outils. — Qu'il s'agisse de point-par-point ou de contournage, la commande numérique est à même de résoudre tous les problèmes. En dehors de la régularité des fabrications qu'elle assure, elle supprime beaucoup de montages, réduit les



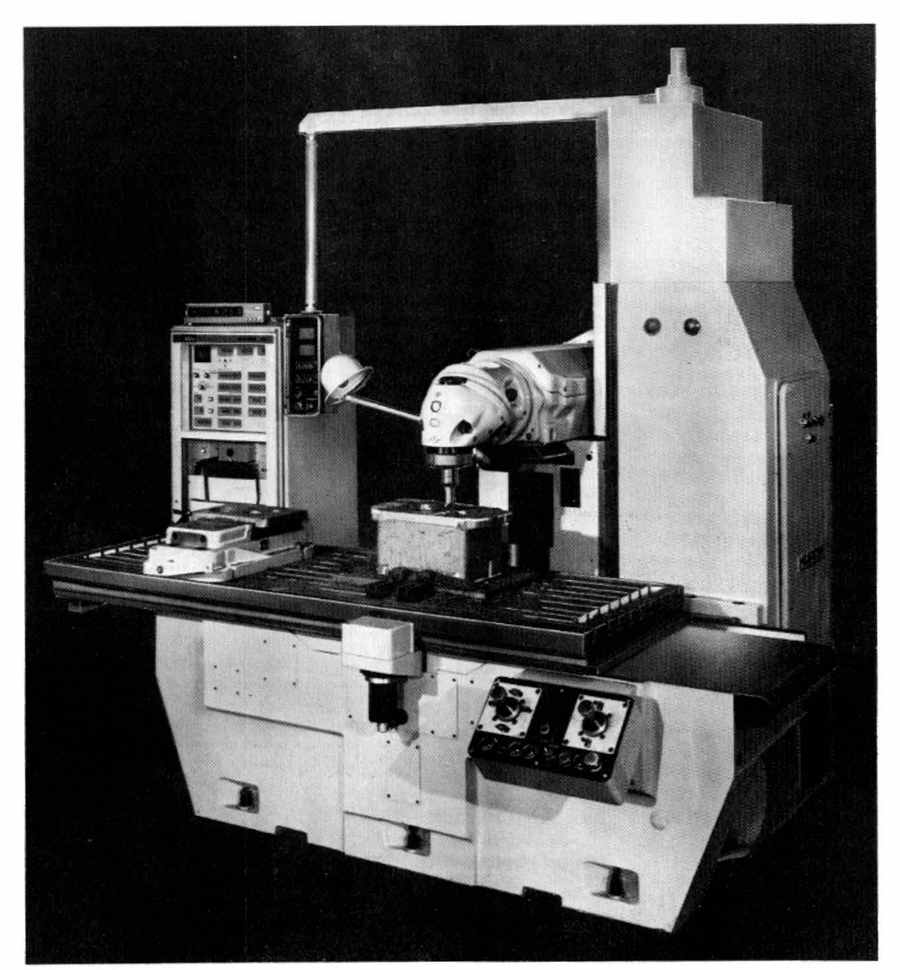
Centre d'usinage complet (*G.S.P.*)



Centre d'usinage (*Forest*)



Tour à commande numérique
(*Sculfort*)



Fraiseuse à
commande numérique
(*Huré*)

outillages et procure ainsi de nombreuses économies. En revanche, elle impose, à l'origine, des dépenses importantes puisqu'une fraiseuse courante voit son prix à peu près triplé par l'adjonction d'un dispositif à commande numérique. De plus, ce dispositif doit fonctionner parfaitement et, à cet effet, les déplacements qu'il imprime aux éléments mobiles doivent être tout à fait réguliers et surtout sans frottements inutiles.

Cette nécessité a conduit les constructeurs de machines-outils à apporter à certains organes de leurs machines des modifications importantes. Parmi celles-ci, on peut signaler une rectitude plus grande des glissières, ainsi que leur lubrification au moyen de films d'huile d'épaisseur constante ou même l'emploi de coussins d'air pour réduire les frottements. C'est surtout la généralisation de l'emploi de vis à billes ou à circulation de billes qui s'est développée en raison des avantages obtenus dans la diminution des frottements. L'expérience a, d'ailleurs, prouvé que les machines courantes n'offraient pas un rendement excellent avec la commande numérique, ce qui explique les déboires dont se sont plaints certains utilisateurs.

1.6. Domaines d'emplois de la commande numérique. — La commande numérique s'applique à la plupart des types de machines-outils et même à des machines à dessiner et à des appareils de mesure, etc. en raison des avantages qu'elle apporte à leur utilisation; limitée d'abord aux perceuses et aux fraiseuses, elle s'applique aux tours, aux rectifieuses, aux presses, aux scies, etc.

1.7. Les centres d'usinage. — La commande numérique est à la base du développement de ce qu'on appelle les centres d'usinage (en anglais *Machining Centers*). Au début, ces machines étaient de simples aléseuses-fraiseuses dont les possibilités d'usinage étaient améliorées au moyen d'accessoires variés. Désormais, les centres d'usinage sont dotés de nombreux outils qui permettent des usinages extrêmement variés et c'est cette profusion d'outils qui en constitue la caractéristique essentielle. Suivant les cas, les outils sont changés à la main ou, au contraire, mis en place et enlevés automatiquement. Le succès des centres d'usinage ne cesse de grandir et on peut trouver sur le marché des modèles de toutes les tailles.

2. LES MACHINES SPÉCIALES

Parmi les machines dites spéciales, on peut considérer deux cas:

— D'une part, les machines qui sont des améliorations de machines existantes notamment par adaptation de dispositifs nouveaux qui en transforment l'efficacité. Elles commencent à être utilisées industriellement; même si elles ne sont pas encore très répandues, elles trouveront vraisemblablement un champ d'action dans lequel elles auront une priorité sur les autres machines.

— D'autre part, les machines basées sur des principes nouveaux qui les font sortir du domaine de la machine-outil ordinaire et qui n'ont pas encore, pour la plupart, pénétré dans les ateliers d'une manière courante.

2.1. Les machines améliorées. — Ce sont essentiellement les machines à rectification rapide et les machines à commande numérique adaptative.

2.1.1. La rectification rapide. — De date très récente, elle est réalisée à l'aide de meules tournant à des vitesses considérables; la vitesse d'un point de la périphérie de la meule peut dépasser 100 m/s. Cela permet d'obtenir des résultats tout à fait inattendus, qu'il s'agisse d'état de surface ou d'enlèvement de métal. Il ne saurait être question d'atteindre ces résultats avec des machines ordinaires ni avec des meules courantes; les broches de rectification doivent être particulièrement bien équilibrées et préservées de toute cause de frottement possible, car les vitesses à atteindre sont, évidemment, exceptionnelles. La machine doit avoir une stabilité complète et une très grande résistance aux vibrations; de plus, les meules ne doivent, en aucun cas, se désagréger car des fragments détachés à de telles vitesses de rotation constituent un danger très grand C'est, d'ailleurs, cet inconvénient qui retarde le développement de cette technique; seul l'emploi de meules dont la vitesse d'un point de la périphérie ne dépasse pas 60 m/s est autorisé (fig. IV-13).

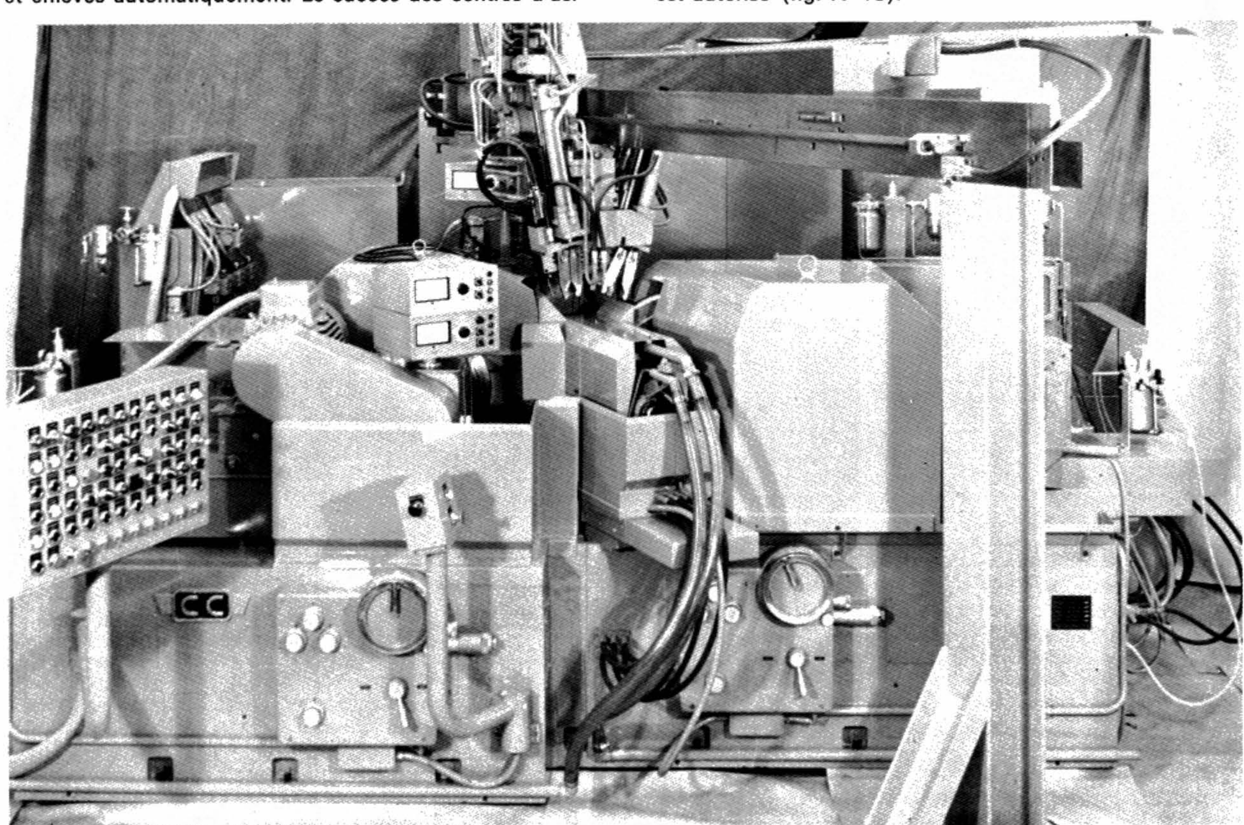


Fig. IV-13 — Machine à rectifier rapide (60 m/s) avec affûtage automatique des meules (*Constructions de Clichy*)

2.1.2. La commande adaptative. — C'est une forme évoluée de la commande numérique (fig. IV-14). Celle-ci est, en effet, essentiellement à base de cinématique : elle permet d'obtenir des vitesses déterminées à l'avance sans qu'il soit possible de les modifier. Or, beaucoup de pièces ne peuvent être usinées dans toutes leurs parties avec les mêmes vitesses, soit parce que la nature de la matière constitutive varie, soit à cause de points durs inconnus, soit aussi parce que les formes extérieures ne peuvent être usinées avec une vitesse uniforme.

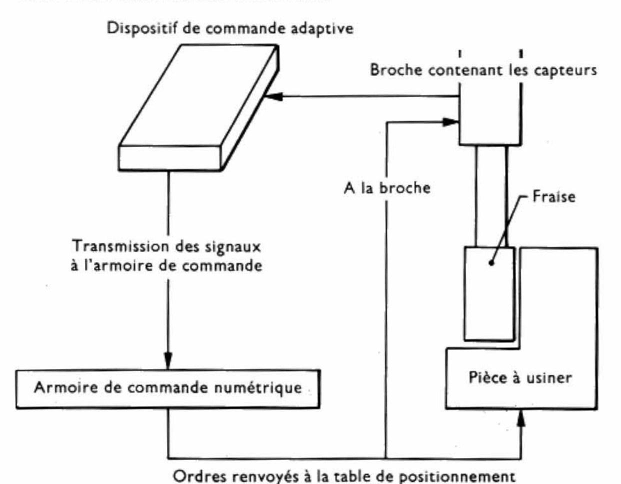


Fig. IV-14 — Dispositif de commande adoptive

Dans la commande adaptative, des capteurs sont placés en certains endroits, notamment dans les broches, et leur action, au moment où une variation de vitesse de coupe (donc de rotation de broche) est nécessaire, consiste à « donner » des ordres de ralentissement ou d'accélération au moteur. Ces variations que l'on peut ainsi obtenir pour adapter les vitesses à la coupe simple sont suffisamment intéressantes pour qu'il en résulte des gains de rendement dans l'ensemble de l'usinage. L'augmentation de prix que représente une commande adaptative par rapport à une commande numérique ordinaire est ainsi assez vite amortie.

2.1.3. L'usinage à chaud. — Aux procédés d'usinage entrant dans la première catégorie on peut ajouter les méthodes d'usinage à chaud ; elles sont appliquées lorsque les pièces sont constituées par des alliages à base de métaux durs comme le titane, sur lesquels les outils ordinaires ne pourraient avoir de prise effective. Par un chauffage réglé de manière à éviter toute altération des propriétés métallurgiques de ces alliages, on peut diminuer la dureté de la pièce assez profondément pour que l'usinage soit possible. Le chauffage n'en reste pas moins difficile à réaliser : ou bien on l'effectue avant montage de la pièce sur la machine, ou bien on utilise un chauffage électrique au moyen d'enroulements de conducteurs qui se déplacent de manière à ne pas contrarier l'usinage. Beaucoup d'usines d'aviation ont utilisé des procédés de chauffage en les mettant au point pour chaque cas particulier ; toutefois, cette technique paraît être restée dans ce domaine particulier où, d'ailleurs, le prix de revient reste secondaire vis-à-vis du résultat à atteindre.

2.2. Les machines basées sur des principes nouveaux. — Les machines utilisant des principes nouveaux peuvent être caractérisées par le fait que l'outil n'est plus un outil de mécanique ; l'usinage est obtenu soit par électro-érosion, soit par électrolyse, soit par des moyens chimiques, soit par ultrasons.

À cette liste qui correspond à des techniques relativement éprouvées, il est possible d'ajouter celle mettant en œuvre des lasers, des faisceaux d'électrons ou des plasmas.

2.2.1. L'usinage par électro-érosion. — C'est, de tous les procédés énumérés ci-dessus, celui qui paraît être le plus près d'atteindre la masse des ateliers courants. Il consiste à utiliser les propriétés d'une étincelle électrique d'engendrer une action érosive sur les matériaux tels que les produits ferreux. Le savant Priestley avait découvert cette propriété dès le XVIIIe siècle, mais il a fallu attendre 1940 pour que des essais industriels soient effectués en U.R.S.S. (Lazarenko). Dans cet usinage l'étincelle électrique joue un rôle un peu analogue à celui des abrasifs d'une meule ; il faut donc disposer de nombreuses étincelles en un temps très court. En fait, l'action de l'étincelle, qui est à une température élevée, est une action de fusion du métal en un point, et il y a autant de fusions que d'étincelles. Selon la nature de l'usinage à réaliser, les étincelles peuvent être à une température plus ou moins élevée ; si la température est plus basse, la fusion est moins efficace, mais l'état de surface reste meilleur.

Il est facile de produire une étincelle électrique puisqu'il suffit d'une décharge de condensateur entre deux électrodes. Cependant les constructeurs se sont attachés à créer des dispositifs avec lesquels l'opérateur est davantage maître de la production de l'étincelle elle-même. Sans entrer dans des détails électriques, on peut ranger ces dispositifs en deux catégories :

— les générateurs à caractéristiques dites dépendantes : il suffit de rapprocher les électrodes par des procédés mécaniques et l'étincelle éclate lorsque la distance entre les deux électrodes est suffisamment petite ;

— les générateurs à caractéristiques indépendantes dans lesquels l'éclatement de l'étincelle est commandé par un dispositif électrique indépendamment de la distance des électrodes (fig. IV-15).

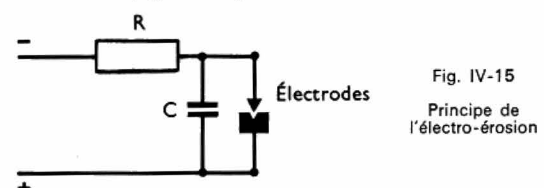


Fig. IV-15
Principe de l'électro-érosion

Plusieurs générateurs ont été mis au point (oscillateur à relaxation, circuits oscillants, dispositifs électromagnétiques à accumulateurs d'énergie). On peut signaler que l'emploi des thyristors permet d'obtenir plus de 100 000 étincelles par seconde. Suivant la qualité de ces étincelles, on obtient des résultats qui peuvent varier en fonction du travail à exécuter : l'usinage proprement dit peut être accéléré par une plus grande production d'étincelles, mais on risque d'obtenir un état de surface plus rugueux. Au contraire, si l'on recherche une action d'affûtage, les étincelles doivent être faibles et ne pas laisser de traces apparentes de fusion ou d'évaporation du métal. On admet que la précision d'un usinage peut atteindre 0,01 mm et que les irrégularités laissées sur la surface ont des dimensions de l'ordre de 1 micromètre ; il semble, toutefois, que ces deux chiffres doivent être améliorés, le premier en utilisant des machines à électro-érosion mécaniquement plus précises, le deuxième grâce à une amélioration très nette de la production d'étincelles.

Les électrodes utilisées sont en laiton, en cuivre, en graphite ou en alliages de tungstène ; dans les deux premiers cas, les électrodes peuvent prendre facilement la forme voulue. Lorsqu'il s'agit de graphite, quelques constructeurs ont fabriqué des machines pour mouler les électrodes et d'autres machines pour les remettre en forme. On ne peut en faire autant lorsqu'on utilise le tungstène, mais les électrodes fabriquées avec ce métal s'usent très peu. L'usure des électrodes varie de 70 % pour les électrodes peu résistantes à 5 % pour les électrodes difficiles à altérer ; ce coefficient représente le rapport de la masse de matière enlevée sur l'électrode à la masse de matière enlevée sur la pièce. On conçoit donc combien il est nécessaire de régénérer ou de changer les électrodes aussitôt que la nécessité s'en fait sentir.

Les applications de l'électro-érosion sont de deux natures différentes : utilisation en concurrence avec des procédés ordinaires, utilisations spéciales. Dans le premier cas, on peut mentionner l'affûtage qui concurrence l'affûtage chimique et l'affûtage électrolytique. D'excellents résultats sont obtenus. Lorsque les électrodes sont montées sur des ma-

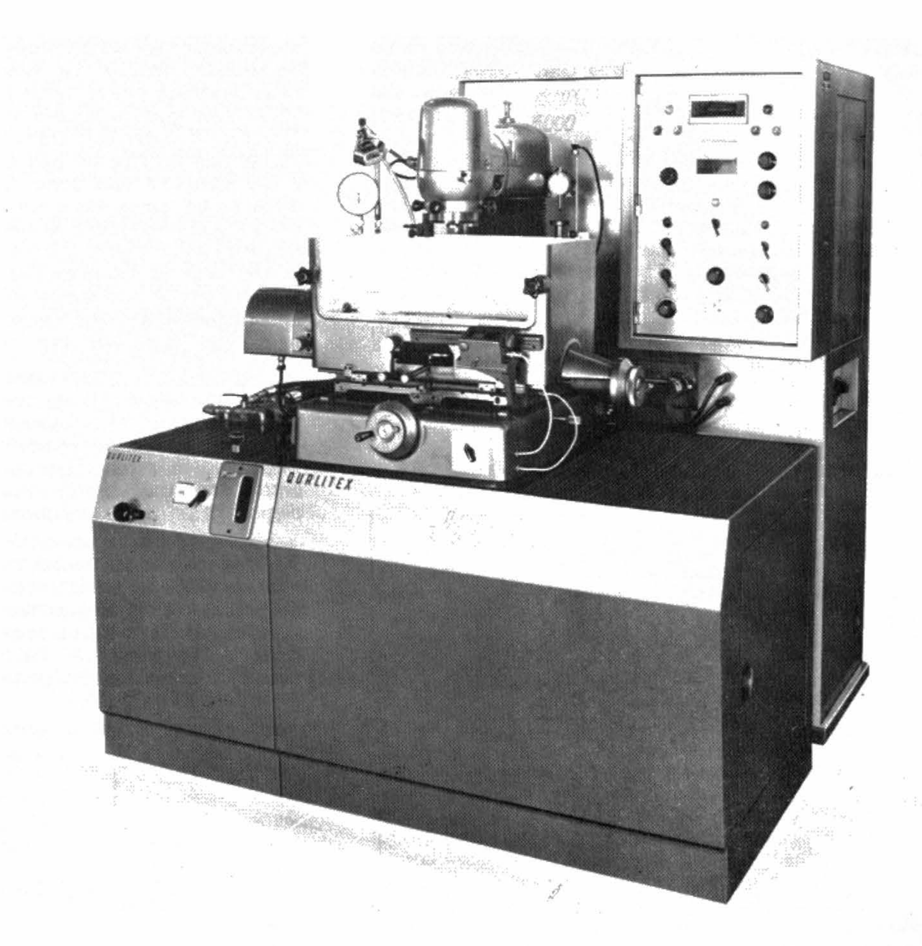


Fig. IV-16

Machine à pointer par étincelage en coordonnées rectangulaires (*Alain Maisonneuve-Qualitex*)

chines de haute précision, on peut également obtenir des usinages très précis pourvu que les électrodes soient fines. À cet effet un constructeur a utilisé un bâti de machine à pointer pour donner au travail d'érosion une grande précision (fig. IV-16). Parmi les utilisations spéciales, on citera le découpage profond, l'usinage des contours des pièces épaisses et certains usinages spéciaux. Les découpages profonds s'effectuent presque toujours en plaçant la pièce dans un bain de pétrole afin d'obtenir une meilleure concentration de l'étincelle; il en est de même des contours de pièces épaisses. Parmi les travaux spéciaux, on citera l'usinage des carbures métalliques qu'il est presque impossible d'exécuter autrement et l'usinage de pièces non métalliques en raison de l'absence d'efforts mécaniques dans ce mode d'usinage.

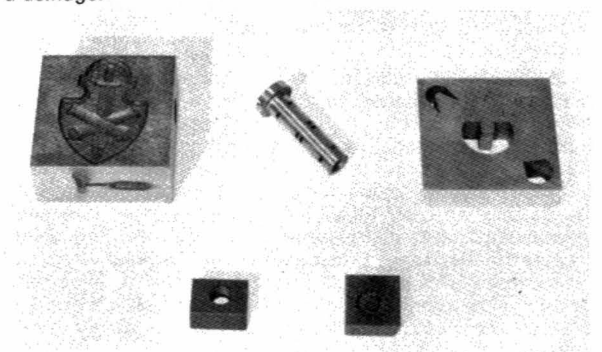


Fig. IV-17 — Exemples d'usinage par électro-érosion

Par usinage de pièces épaisses il est possible d'obtenir des formes très variées : ailettes, par exemple. La figure IV-17 représente des exemples de la variété de ces usinages.

Par ailleurs, les constructeurs de tours automatiques fondent actuellement de grands espoirs sur l'électro-érosion pour usiner certaines parties de cames difficiles à fabriquer à la machine et que l'on termine souvent à la main (c'est le cas de cames en carbure). Cette méthode viendrait ainsi en concurrence avec l'emploi des machines à commande numérique; elle pourrait, en tout cas, la compléter lorsque les usinages présentent des points de rebroussement que la commande numérique elle-même ne pourrait traiter.

2.2.2. L'usinage par électrolyse. — L'usinage par électrolyse est un procédé assez original qui semble avoir été lancé en U.R.S.S. pour remédier à une pénurie de diamants nécessaires à l'affûtage des outils en carbure. Le principe est assez simple, car c'est celui de l'électrolyse. Dans un bain conducteur on place deux électrodes: une anode qui est la pièce elle-même à usiner et une cathode

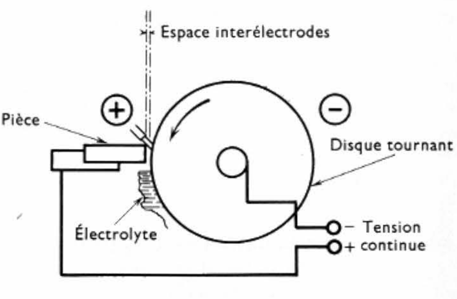


Fig. IV-18

qui est la meule; ces deux éléments doivent être conducteurs. Le courant transporte des éléments métalliques de l'anode vers la cathode; ils sont absorbés par le bain et la surface de la pièce est ainsi une couche plus tendre et plus facilement attaquée par la meule (fig. IV-18).

Le liquide utilisé doit être bon conducteur et également sans action corrosive. Le silicate de soude, utilisé dans les premiers essais, n'était pas assez bon conducteur

et a été remplacé par des solutions à base de chlorure ou de nitrite de sodium ; grâce à ces nouveaux liquides, le rendement de l'usinage électrochimique a été considérablement amélioré.

On peut ainsi souvent se passer de meules diamantées tout en obtenant des rendements beaucoup plus grands que dans le meulage classique. L'une des applications les plus importantes de l'usinage électrochimique est l'affûtage (notamment des carbures). En ce qui concerne la qualité de l'affûtage, les résultats obtenus sont au moins aussi bons que par n'importe quel autre procédé ; en ce qui concerne les prix, malgré des rendements excellents, il est douteux qu'ils soient moins élevés que pour l'affûtage ordinaire. La comparaison avec l'affûtage par électro-érosion n'est pas encore très nette car si la solution électrolytique paraît être, en ce moment, plus précise et offrir des surfaces plus polies, l'électro-érosion s'améliore sans cesse ; les différences de prix sont peu importantes, pour l'instant, entre ces deux procédés. Il convient d'attendre les résultats qu'une longue pratique en atelier peut seule donner.

L'usinage électrolytique ne se réduit pas à des affûtages ou, en allant plus loin, à des rectifications. On peut également utiliser ce procédé pour des forages et des perçages, etc. ; des applications de toute nature se présenteront certainement aussitôt que les difficultés relatives à l'appareillage qu'il faut mettre en œuvre se seront atténuées.

2.2.3. L'usinage chimique. — Il est assimilable au polissage par voie chimique utilisé en métallurgie pour les études micrographiques. Dans un tel usinage on enlève les parties de métal extrêmement faibles et on obtient des surfaces très polies. Il s'agit, en fait, de finition d'usinage.

2.2.4. L'usinage par ultrasons (fig. IV-19). — Les ultrasons permettent d'obtenir une énergie considérable sous un faible volume. Dans le cas particulier de l'usinage, on communique des vibrations longitudinales à fréquence ultrasonore à un outil dont la forme (en relief) est la même que celle du creux à faire dans la pièce. Entre la pièce et l'outil on interpose un abrasif et l'on obtient un véritable rodage. L'abrasif est, en général, du carbure de bore mélangé à un liquide ; le rodage est obtenu par un véritable martelage de l'outil sur les grains d'abrasif qui exercent alors leur action sur la pièce. Les fréquences utilisées sont très élevées et atteignent 20 000 Hz. L'usinage par ultrasons présente surtout de l'intérêt pour les produits mauvais conducteurs de l'électricité ; verre, quartz, céramiques ; la vitesse du travail est d'autant plus grande que la matière traitée est plus fragile. Par exemple, dans le cas du verre, on peut enlever jusqu'à 30 millimètres cubes par minute. Les états de surface sont, en général, excellents ; ils ne dépendent que de la grosseur des grains d'abrasifs. L'intérêt de l'usinage par ultrasons est évident lorsqu'il s'agit de travaux qu'on pouvait difficilement exécuter par d'autres moyens ; l'usinage du verre, en particulier, en est un exemple frappant. Toutefois, ce procédé est encore d'un emploi restreint.

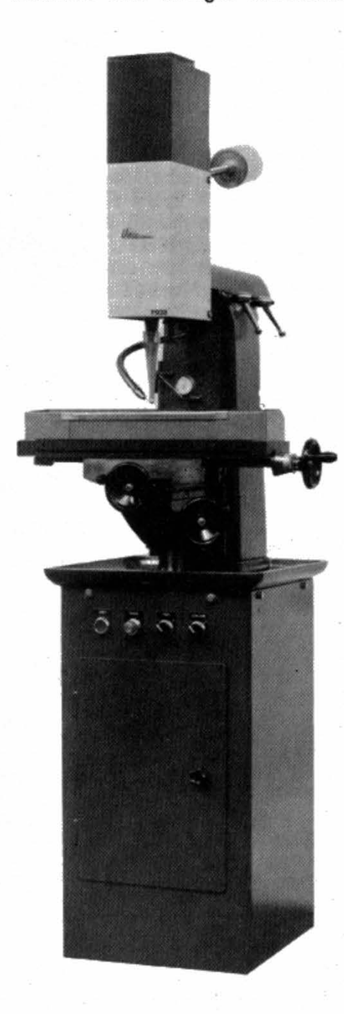


Fig. IV-19

Machine à usiner par ultrasons (*Studio Max-Ultrasonic*)

2.3. Autres techniques. — Les autres techniques sont encore à l'état expérimental. Les lasers, en particulier, dont les applications spatiales ou l'emploi, plus modeste, en métrologie (pour obtenir des franges d'interférences) sont déjà bien connues, n'ont pas encore trouvé une utilisation pratique dans l'usinage. Leur intérêt provient du fait que l'on dispose d'une très grande énergie dans un seul rayon ; on utilise cette propriété pour exécuter, parfois à distance, des perçages sur des plaques d'acier, mais de telles applications restent encore très limitées.

Les faisceaux d'électrons sont peut-être d'une application prochaine moins éloignée. L'impact d'un faisceau d'électrons accélérés en un point d'une pièce provoque une élévation de température telle qu'il se produit un enlèvement de matière par vaporisation. On peut obtenir assez facilement des faisceaux d'électrons très fins d'une largeur de 0,01 mm et les utiliser pour pratiquer des fentes de 0,02 mm de largeur (fig. IV-20). La vitesse du travail atteint 150 mm par minute.



Fig. IV-20

Fente usinée par faisceau d'électrons dans une tôle d'acier de 0,5 mm d'épaisseur (*Zeiss*)

Grâce à ces propriétés, il est possible d'usiner des pièces assez complexes sous forme soit de contours, soit de fentes. Un autre intérêt de ce dispositif est qu'il permet de travailler sur des matières extrêmement variées au lieu d'être limité aux produits ferreux. Les isolants, en particulier, peuvent être usinés par ce procédé. L'appareil à faisceaux d'électrons le plus communément utilisé ressemble beaucoup à un microscope électronique.

L'emploi des plasmas permet des usinages spéciaux puisque les températures obtenues dans un arc de plasma dépassent 7 000 °C et peuvent même atteindre 15 000 °C. Les usinages correspondants ne sont pas courants ; on en trouve quelques exemples intéressants dans les travaux relatifs à l'énergie atomique.

CHAPITRE V

NORMES, QUALITÉS, ORGANISATION ET AVENIR DE L'OUTILLAGE

L'avenir de l'usinage est l'une des grandes préoccupations de l'industrie moderne, aussitôt qu'il s'agit de s'approcher de la solution idéale consistant à usiner sans perte de temps et aux prix les plus bas possibles. Cette préoccupation étant partagée par tous, la nécessité de faire des progrès techniques ne peut être évitée. Un autre désir consiste aussi à réduire au minimum la main-d'œuvre employée, pour des raisons financières et, également, pour obtenir une régularité plus grande dans les fabrications; l'automatisation ne peut donc que se développer de plus en plus dans les entreprises importantes et même moyennes. Toutefois, il existe un très grand nombre d'entreprises, dites petites, qui occupent seulement quelques dizaines d'ouvriers et dont les travaux sont souvent beaucoup trop variés pour justifier un équipement atteignant un prix élevé. Il serait donc déraisonnable de céder à la tentation de ne prendre que les grandes entreprises comme objectif d'une modernisation future. Pour un pays, l'amélioration des conditions de travail des entreprises de faible importance représente un intérêt qu'on a parfois tendance à sous-estimer.

L'avenir de l'usinage ne peut être examiné en dehors de certaines notions dont quelques-unes sont nouvelles. On peut indiquer les suivantes : l'analyse de la valeur, le recours à des maisons spécialisées et, surtout, les recherches scientifiques et techniques.

1. L'ANALYSE DE LA VALEUR

Notion théoriquement nouvelle, elle englobe de nombreuses observations déjà faites. On peut la résumer ainsi : une pièce déterminée a une valeur propre qui lui est conférée à la fois par la qualité de sa matière et de sa fabrication, par les services qu'elle rend et par son aspect esthétique. On ne peut éliminer ce dernier élément, même s'il n'est pas prédominant pour l'usage du produit, car il s'agit là de considérations commerciales; le cas des formes des automobiles est souvent à ranger dans cette catégorie. En revanche, aussitôt qu'on est certain de l'aptitude de la pièce à rendre les services qu'on en attend, les bureaux d'études et les bureaux de fabrication doivent mettre tout en œuvre pour simplifier la fabrication de la pièce et, en particulier, pour rendre son usinage plus facile. Alors qu'autrefois on recherchait des formes inutilement complexes mais qui paraissaient « artistiques », il importe maintenant d'arriver aux formes répondant le mieux à un usinage simple et peu coûteux. De nombreuses tentatives sont faites actuellement pour résoudre ce problème qui est souvent vital pour l'entreprise. Dans la fabrication des moteurs de camions automobiles, notamment, des économies dépassant 20 % sont encore réalisées par l'étude de chaque pièce, étude à laquelle participent tous les intéressés, depuis les dessinateurs jusqu'aux chefs d'atelier.

2. LE RECOURS À DES MAISONS SPÉCIALISÉES

Un double aspect les justifie : la fabrication en sous-traitance de pièces ou d'éléments de pièces et la fabrication d'outillages. Cette double notion intéresse assez nettement les petites entreprises. La fabrication en sous-traitance consiste à spécialiser certains ateliers dans les fabrications où ils ont une maîtrise indiscutable et à ne pas vouloir tenter d'usiner toutes les pièces lorsqu'on n'est pas équipé pour le faire. Lorsqu'une entreprise arrive à disposer d'un réseau rationnel de sous-traitants, les équipements de chacun d'eux sont réduits au minimum et le rendement, comme les prix de revient, sont considérablement améliorés. Cette méthode ne peut dispenser les sous-traitants d'une certaine vigilance, au cas où l'entrepreneur principal serait défaillant mais, compte tenu de ce danger possible, l'activité des entreprises sous-traitantes de faible importance peut être presque toujours assuré.

En ce qui concerne les outils eux-mêmes, une évolution s'est dessinée : autrefois, il n'était pas rare que les ateliers préfèrent fabriquer eux-mêmes certains de leurs outils, persuadés qu'ils étaient de les réaliser mieux que quiconque et à des prix beaucoup plus bas. Cette notion, que l'on pouvait défendre pour les outils simples de tours ou de raboteuses ou même pour des fraises, est beaucoup moins admissible à l'époque actuelle où, par exemple, les outils à bouts rapportés en carbure ont pris l'importance que l'on sait. C'est pourquoi le recours à des maisons spécialisées se répand de plus en plus avec, comme condition préalable, une normalisation des outils qui permette de fabriquer chaque modèle en série et non à la demande, de manière à obtenir des prix plus bas.

3. LES ÉTUDES ET LES RECHERCHES

Quant aux services d'études et de recherches, ils jouent actuellement et joueront de plus en plus un rôle de premier plan, aussi bien pour l'outillage que pour les machines elles-mêmes. Il n'est que trop évident que beaucoup d'ateliers n'ont pas les moyens en personnel et en matériel leur permettant de faire des études qui, la plupart du temps, ne peuvent aboutir à des résultats concrets immédiats. La recherche demande une tournure d'esprit qui n'est pas courante et l'embauchage d'un chercheur, à plus forte raison d'une équipe de chercheurs, représente des frais généraux considérables, disproportionnés souvent avec les services qu'on peut attendre dans le cadre restreint de l'atelier. Il en est de même du matériel consistant en machines et appareils spéciaux, en instruments de mesure d'un maniement délicat, etc. L'étude de l'application de la commande numérique, pour prendre ce seul exemple, échappe à la plupart des ateliers dans lesquels la mécanique a été considérée depuis toujours comme la seule technique de base.

D'une manière générale, les études d'usinage sont conduites dans le monde soit par l'industrie privée, soit par des établissements d'État, soit par des méthodes mixtes.

La première formule est essentiellement celle des États-Unis où les constructeurs atteignent des tailles assez considérables pour disposer de leurs propres laboratoires.

La deuxième formule est surtout celle des pays venus assez tard à l'industrie de l'outillage; leur action est non seulement faite de recherches, mais aussi d'organisation de l'industrie tout entière. L'U.R.S.S. dispose, à ce titre, de l'E.N.I.M.S. qui est une organisation d'État, groupant des professeurs, des industriels et des techniciens. Cet institut procède à des recherches permanentes sur des sujets tels que l'électro-érosion et se trouve chargé aussi du lancement de la fabrication de certains modèles entièrement étudiés et jugés aptes à un service courant. L'autorisation de fabriquer ces modèles ne s'applique qu'à une tranche déterminée, les tranches suivantes devant bénéficier des résultats des recherches techniques qui se poursuivent sans arrêt. Au Japon, plusieurs organismes d'État procèdent aux études les plus variées, depuis les performances des outils jusqu'à la mise au point de machines délicates telles que les machines à pointer. Ces deux pays, avec l'appui de ces organisations d'études, ont complètement transformé leur industrie autrefois inexistante ou déficiente.

La solution mixte est, en fait, celle des pays européens qui presque tous disposent de services d'État ou d'organisations corporatives. En France, c'est surtout le C.E.R.M.O. (Centre d'études et de recherches de la machine-outil), organisme corporatif du syndicat des constructeurs de machines-outils, qui procède à ces études avec de temps en temps une aide de l'État. En Italie, l'État joue peut-être un rôle plus important; dans les autres pays, notamment en Belgique et en Allemagne, des services publics d'universités, sous l'impulsion d'éminentes personnalités, apportent à l'industrie une aide considérable.

4. LES PERSPECTIVES D'AVENIR

Il semble donc que les travaux nécessaires aux progrès de l'usinage puissent être entrepris avec toutes chances de succès. On s'est demandé également si l'évolution des idées et des moyens ne devait pas apporter des bouleversements profonds dans l'usinage proprement dit.

On laissera de côté, par manque d'informations, les possibilités de bouleversements techniques que les lasers, les plasmas et autres méthodes avancées pourraient apporter et on se bornera à exprimer l'opinion suivante : l'usinage ayant pour effet immédiat de couper de la matière et, par conséquent, de créer un gaspillage de celle-ci en même temps qu'une déperdition d'énergie, peut-on espérer réduire un tel paradoxe à des proportions plus faibles ? Il n'est pas très facile de répondre actuellement à une telle question d'une manière définitive. On peut simplement signaler quelques efforts qui sortent du cadre du présent chapitre et sur lesquels on ne donnera pas, pour cette raison, de développements importants ; ces efforts portent sur le formage, le roulage et le moulage.

4.1. Le formage. — Cette opération consiste à obtenir une pièce à partir d'un demi-produit sans avoir à l'usiner. On éliminera tout de suite le formage à chaud pour prendre seulement en considération le formage à froid ; celui-ci s'est considérablement développé grâce à la mise au point d'outillages tels que les presses ou des machines spéciales qui permettent d'obtenir des pièces finies sans qu'il soit nécessaire de pratiquer le moindre usinage ; parfois même la rectification est inutile. La vitesse de production est très grande, l'économie de matière considérable. Le seul inconvénient provient du poids, de l'encombrement et du prix non seulement de la machine, mais aussi des outillages nécessaires. Pour l'instant, le formage à froid apporte un moyen de production supplémentaire, il ne supprime pas les machines à enlèvement de copeaux.

4.2. Le roulage. — Cas particulier du formage à froid, il tend à prendre une importance de plus en plus grande. Après avoir été appliqué aux filetages, il a servi à la fabrication d'engrenages de petites dimensions et il permettrait d'obtenir les engrenages correspondant aux boîtes de vitesses des voitures automobiles. Les avantages considérables d'économie qui en résulteraient n'apparaissent toutefois qu'après la production d'un grand nombre de pièces, proche de quatre millions ; il faut donc que des progrès soient accomplis en vue de la réduction de ce nombre pour que l'on trouve, tout au moins en Europe, un intérêt à ce procédé qui débarasserait les ateliers de l'obligation de recourir exclusivement aux machines à tailler les engrenages dont les prix sont toujours très élevés.

4.3. Le moulage. — Le moulage des poudres frittées a connu et connaît toujours un développement considérable pour la fabrication de pièces de faibles dimensions et qui ne sont pas destinées à recevoir des chocs. Dans beaucoup de cas, notamment pour des pièces légères intervenant dans l'industrie téléphonique, ces méthodes concurrencent sévèrement les tours automatiques autant par la rapidité de fabrication que par les bas prix de revient. Cette fabrication fait l'objet d'installations qui ne sont pas réellement mécaniques ; de plus, les métaux frittés constituent des produits qui, tout en étant assez répandus, ne sont pas tout à fait courants.

4.4. Conclusions. — Les concurrences dont il vient d'être fait mention présentent sans aucun doute un très grand intérêt mais ne sont pas susceptibles, pour l'instant, de changer d'une manière notable la physionomie de l'usinage. Tout d'abord, les machines-outils classiques : tours, fraiseuses, perceuses seront toujours nécessaires dans les petits ateliers, notamment les ateliers artisanaux dans lesquels les fabrications varient sans cesse, au point qu'il n'est pas possible de parler de séries, même faibles. De plus la rectification sera, semble-t-il, pendant longtemps un procédé de finition très difficile à remplacer aussitôt que l'on désirera obtenir un état de surface d'une certaine qualité. Par ailleurs, dans les fabrications plus évoluées, la commande numérique apporte des solutions dont l'intérêt complet n'est pas encore connu ; on cite pourtant des cas où des pièces, obtenues autrefois par moulage, sont actuellement réalisées d'une manière beaucoup plus avantageuse par usinage en commande numérique. De plus, les pièces très importantes et les très grandes séries échappent pour l'instant à ce genre de concurrence.

L'avenir de l'usinage, tel qu'il est compris actuellement, est donc loin de paraître en danger si l'on considère seulement les exemples ci-dessus. C'est donc plutôt à partir des techniques avancées que des bouleversements pourraient se produire. Pour l'instant, on notera surtout que des progrès incessants sont réalisés aussi bien dans les machines que dans les outillages et dans les méthodes de travail et il suffit de comparer les formes des machines, leurs capacités de travail et les facilités de maniement pour se rendre compte de l'évolution qui s'est produite.

5. LA QUALITÉ D'USINAGE. SON CONTRÔLE

L'usinage a pour objet d'obtenir des pièces de formes déterminées avec des tolérances nettement exprimées et, le cas échéant, des états de surface bien définis. Pendant longtemps, cette notion qui paraît simple n'avait pas été présentée avec netteté et l'on se contentait d'imposer un usinage aussi parfait que possible pour les pièces de précision, en marquant sur les tracés les points auxquels cette recommandation correspondait. De plus, pendant longtemps, on ne disposait pas à l'atelier de moyens de vérification suffisants. Par ailleurs, les principes pourtant simples de l'interchangeabilité et de la nature exacte de ce que l'on appelle précision n'étaient pas clairement explicités. Ce sont les travaux de normalisation, nationale d'abord, internationale ensuite, qui ont permis d'énoncer exactement les principes de la théorie des ajustements à partir desquels les questions de tolérances ont été mises au point. Dans un autre ordre d'idées, les fabrications de haute précision, comme celles des moteurs dans l'automobile ou des réacteurs, ont imposé l'examen approfondi des surfaces destinées à jouer un rôle important dans le fonctionnement des objets usinés ; l'écoulement des fluides en est un exemple particulièrement net. Or, les défauts de surfaces dont il s'agit n'ont pas de répercussion sur les dimensions de la pièce ; elles ont été qualifiées de microgéométriques. Il a, par conséquent, été nécessaire de les analyser et de trouver les moyens de les contrôler. Dans ce cas aussi, de nombreux travaux de normalisation sont en cours, mais on n'est pas encore arrivé à une unification complète des définitions.

5.1. Les tolérances et l'interchangeabilité. — Lorsqu'une pièce est usinée, elle doit avoir certaines dimensions parmi lesquelles les parties utiles doivent répondre à une précision déterminée, les autres dimensions pouvant faire l'objet de moins de soins. Par exemple, les glissières d'une machine-outil doivent répondre à certaines conditions qui sont imposées par les services qu'on en attend : guidage rectiligne, parallélisme de plusieurs glissières entre elles, etc. Le bâti, au contraire, n'est pas soumis à des exigences de précision, pourvu qu'il présente certaines qualités : solidité, poids, éventuellement place pour les moteurs, etc. La fixation des tolérances pour les dimensions importantes de pièces isolées est donc relativement simple car elles ne sont tributaires de la qualité d'aucune autre pièce.

Il n'en est pas de même lorsque deux ou plusieurs pièces doivent être assemblées l'une sur l'autre. Pour simplifier, on se bornera au cas de deux pièces, en supposant qu'il s'agit d'une pièce mâle (arbre) et d'une pièce femelle (alésage). Il est évident que les tolérances de chacune des pièces ne sont pas indépendantes l'une de l'autre ; il suffirait que l'une d'elles soit à la cote minimale (alésage) et l'autre à la cote maximale (arbre) pour que l'ajustement soit impossible, ou ne soit réalisable que par forcement.

La théorie des ajustements, dont l'un des initiateurs a été le Français Le Besnerais, a précisément pour objet de mettre de l'ordre dans cette question. Cette théorie est trop longue pour être rappelée ici dans tous ses détails, on se contentera donc d'en rappeler les éléments essentiels (V. t. 3, Métrologie et contrôle de pièces).

1° Dans la représentation des ajustements, on indique la cote nominale, c'est-à-dire celle qu'aurait la dimension théorique si la pièce était parfaite. Dans l'exemple actuel, c'est le diamètre des deux pièces à ajuster.

2° Les tolérances sont indiquées à partir de la cote nominale, dans le sens de la diminution du diamètre pour l'axe, dans le sens de l'augmentation du diamètre pour l'alésage afin que l'ajustement puisse être réalisable. Ce n'est qu'exceptionnellement, pour des ajustements dits « à forcement », c'est-à-dire avec axe entrant à forcement dans l'alésage, que cette règle subit une exception.

3° Dans l'évaluation des tolérances, il faut tenir compte des erreurs des instruments de mesure. On les indique toujours, par mesure de prudence, comme si elles devaient contrarier l'ajustement, c'est-à-dire diminuer le jeu entre l'axe et l'alésage.

Ces règles essentielles sont complétées par de nombreuses autres indications qu'il faut connaître pour réaliser correctement un ajustement. La notation, en particulier, indique pour chaque pièce la catégorie de tolérance par une lettre (majuscule pour l'alésage, minuscule pour l'axe) et un chiffre. Les catégories de tolérances peuvent, d'ailleurs, ne pas être les mêmes pour l'axe et l'alésage. Grâce à de telles indications, il est possible d'usiner à part un axe et un alésage qui doivent s'ajuster l'un sur l'autre ; de plus, l'indication des tolérances par rapport à la cote nominale a mis fin à des mésententes assez graves (due à l'ambiguïté de la notation : tolérance précédée du signe $\pm$) les tolérances sont désormais désignées par $0 + \varepsilon$ pour l'alésage et par $0 - \varepsilon$ pour l'axe (fig. V-1).

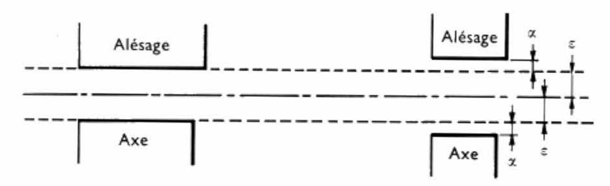


Fig. V-1 — Disposition des cotes et des tolérances
ε = tolérance, α = tolérance supplémentaire pour erreur d'appareil

L'application de la théorie des ajustements a aussi permis de mieux comprendre les informations données par un instrument de mesure. Celui-ci ne peut être parfait et il faut tenir compte de ses erreurs propres. En bonne règle, ces erreurs ne devraient pas dépasser le dixième de la valeur de la tolérance, ce qui est possible lorsque celle-ci est voisine de 0,05 mm. Mais lorsque les pièces sont plus précises, on serait amené à exiger également des précisions de 4 à 5 micromètres pour des tolérances de 0,01 mm ; pour ces catégories de tolérances, on accepte donc que la règle dite du dixième (appareil de mesure dix fois plus précis que la tolérance) soit remplacée par la règle du cinquième et même du quart.

5.2. Contrôle de la surface. — La question des états de surface est plus délicate. Ainsi qu'on l'a indiqué, les défauts microgéométriques n'altèrent pas la cote elle-même, mais seulement le fini de la surface de la pièce. Leur mesure n'est possible qu'au moyen d'appareils très spéciaux ; encore faut-il savoir exactement ce que l'on mesure. Dans certains cas, on évalue la rugosité d'un élément de la surface à l'aide d'un palpeur pneumatique, par exemple, en théorie il faut recommencer l'opération pour l'ensemble de la surface, élément par élément. Il ne semble pas que cette méthode soit très répandue. Un autre procédé consiste à palper la pièce sur toute la longueur d'une ligne, par exemple une circonférence de section droite ou une génératrice, et à enregistrer les différences de lecture dues aux creux et aux aspérités. Étant donné que les erreurs à mesurer sont très faibles, il faut utiliser des palpeurs à pointe très fine, susceptibles de pénétrer dans des creux de très petites dimensions. Compte tenu de ces lectures, on exprime la mesure soit en grandeur réelle, soit en moyenne arithmétique, soit en moyenne quadratique, cette dernière méthode étant appelée R.M.S. (*Root mean square*) (fig. V-2). Il existe des partisans et des détracteurs pour chacune de ces méthodes ; en fait, si l'on cherche à évaluer

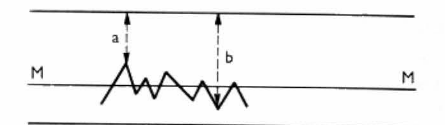


Fig. V-2

a et b représentent les distances extrêmes des creux et des bosses. MM est la ligne R.M.S.

les erreurs extrêmes en creux ou en relief, la première méthode paraît préférable car c'est la seule qui donne la valeur des irrégularités extrêmes. En revanche, si l'on veut situer la cote moyenne de la pièce, compte tenu de ces irrégularités, c'est l'une ou l'autre des méthodes de moyennes qu'on peut adopter. Le choix entre elles fait l'objet de nombreuses controverses qui semblent bien sortir du domaine de l'usinage proprement dit et être du ressort des laboratoires.

6. LA NORMALISATION DES OUTILS

En ce qui concerne leurs formes et, notamment, les dimensions des éléments utilisés pour le montage dans les porte-outils, il est évident qu'une normalisation est extrêmement utile pour permettre aux fabricants de produire en séries. Les normes françaises, préparées par le syndicat de l'outillage et éditées par l'AFNOR, donnent à ce sujet tous les éléments nécessaires. La normalisation ne peut, toutefois, ni être exclusive, ni s'étendre à certains outils spéciaux ; de plus, les progrès techniques sont toujours une cause de modification des machines et également des outils.

Comme on l'a vu, les performances des outils sont à la fois du domaine de l'atelier et de celui du laboratoire ; celui-ci prépare les études et détecte les erreurs à corriger, mais seule l'expérience de l'atelier permet de confirmer si telle modification est heureuse ou non ; parfois même les résultats obtenus par l'atelier facilitent ceux du laboratoire, ce qui a été, en particulier, le cas du fraisage « en avalant ».

7. LA QUALITÉ DES MACHINES-OUTILS

Cette question est l'une des plus délicates à exprimer en valeurs chiffrées. En effet, d'une part, les performances exigées des machines-outils sont difficiles à préciser et, d'autre part, il est encore plus difficile de garantir que ces performances seront maintenues après que les machines-outils aient été utilisées pendant un certain temps. Cette dernière exigence ne peut, d'ailleurs, être satisfaite que par la répétition, à certains intervalles de temps, des opérations de contrôle effectuées sur les machines neuves.

Pendant longtemps, il n'avait pas été nécessaire de codifier la qualité des machines-outils sous forme de conditions de réception unifiées : en effet, d'une part, le nombre des constructeurs de machines-outils était faible et il régnait une certaine confiance entre constructeurs et acheteurs, d'autre part, si un acheteur tenait à contrôler la qualité d'une machine qu'il achetait, il fixait lui-même les conditions qui lui paraissaient opportunes sans que celles-ci aient le moindre caractère de généralité.

Les grands mouvements d'achats et de ventes des machines-outils, l'augmentation du nombre des constructeurs et l'inégalité de leurs fabrications devaient imposer l'étude et la mise au point de conditions de réception unifiées.

7.1. Les vérifications géométriques. — D'après une première théorie, d'origine allemande, ces vérifications ont consisté en des contrôles de dimensions et de position des organes essentiels de la machine sans que celle-ci ait été soumise à un véritable travail. L'expérience a montré assez vite que des machines reconnues bonnes par de tels procédés étaient insuffisantes aussitôt qu'elles exécutaient des usinages ; par ailleurs, d'autres machines sont trop complexes pour permettre une application rationnelle de cette méthode qui excluait inévitablement le contrôle d'éléments tels que ceux de la chaîne cinématique (engrenages, transmissions, etc.).

Ces vérifications géométriques, toujours plus ou moins mises en œuvre, donnent, malgré tout, une valeur indirecte de la qualité de la machine.

7.2. Les épreuves pratiques. — D'après une deuxième théorie, d'origine française, les conditions de réception indiquées ci-dessus ne sont pas exclues, mais passent au deuxième plan. Au premier plan figurent des pièces d'essais que la machine doit usiner dans des conditions bien précises, la sanction de l'épreuve étant la mesure des cotes et des tolérances de la pièce usinée. Cette méthode appelée épreuves pratiques, a l'avantage d'imposer le fonctionnement de la machine jusqu'à la finition de la pièce à usiner, ce qui permet, en même temps, de contrôler la précision que l'on peut obtenir (V. t. 2, Métrologie et contrôle de pièces).

Pour fixer exactement les modalités d'une épreuve pratique, on doit d'abord définir les fonctions essentielles d'une machine ; par exemple, un tour parallèle doit pouvoir surfacer, tourner en l'air et entre pointes, et fileter. Il n'est donc pas indiqué de prévoir d'autres épreuves telles que, par exemple, le perçage.

En conservant l'exemple du tour, on exécute cinq usinages :

— Dressage de la face arrière d'un cylindre monté sur un plateau, à l'aide du chariot transversal.
— Usinage de la partie cylindrique d'un cylindre monté « en l'air ».
— Usinage de la partie cylindrique, sur toute sa longueur, d'un cylindre monté entre pointes.
— Usinage sur une longueur deux fois plus faible d'un cylindre monté entre pointes comme ci-dessus.
— Usinage d'une pièce filetée.

La matière première, les dimensions et les tolérances des pièces, le mode opératoire sont fixés avec précision, c'est pourquoi certaines réserves qui avaient été faites au début, notamment sur le fait qu'on peut parfois obtenir de très bons usinages avec de mauvaises machines, ont complètement disparu.

7.3. Comparaison des deux méthodes. — Pour réaliser exactement l'exécution des vérifications géométriques, il est indispensable de respecter certaines précautions ; d'abord on doit fixer des références auxquelles sont reportées les mesures ; ce sont, par exemple, un plan horizontal contenant si possible une glissière et la verticale matérialisée par un fil à plomb. Pour disposer de ces références, il faut réaliser une très bonne implantation de la machine ce qui n'est pas indispensable dans les épreuves pratiques. Ensuite, on doit éviter d'accumuler des erreurs dont on ne peut garantir la compensation.

Par exemple, la perpendicularité d'une broche de perceuse à la table peut être vérifiée soit directement, soit en contrôlant successivement la perpendiculaire de la colonne à la table, du bras à la colonne et de la broche au bras ; la deuxième méthode, parfaitement rationnelle en principe, comporte trois fois plus d'erreurs. La vérification de l'aptitude du tour à fileter s'effectue très bien par une épreuve pratique. Par le moyen des vérifications géométriques, il faut mesurer la vis-mère elle-même, sans tenir compte de l'influence régulatrice de l'écrou.

La cause des épreuves pratiques gagne de plus en plus d'adeptes, mais les discussions ont été et sont encore vives sur le plan international où certains pays désirent conserver leur point de vue. On rappellera qu'en France, c'est l'AFNOR (Association Française de Normalisation) qui dirige les travaux de normalisation ; sur le plan international, c'est l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) qui est chargée de ce travail, lequel avance lentement pour les raisons indiquées ci-dessus.

7.4. Les conditions de réception des machines à commande numérique. — Tout récemment, le développement des centres d'usinage équipés de commandes numériques a posé le problème de la réception de ce type de machines. La question fait l'objet d'études très suivies ; pour l'instant, les seules conditions de réception qui ont été mises au point sont celles de la NASA, organisme américain d'études spatiales ; ces conditions prévoient des vérifications géométriques peu différentes de celles déjà retenues, le contrôle de l'appareillage de la commande numérique par un fonctionnement à vide de 24 heures, et l'exécution d'une pièce très compliquée comportant des éléments de prismes, de cylindres et des pentes faibles. Il n'est pas certain que ces conditions de réception, extrêmement sévères, puissent convenir pour les besoins courants de l'industrie ; les travaux sur ce sujet sont en cours.

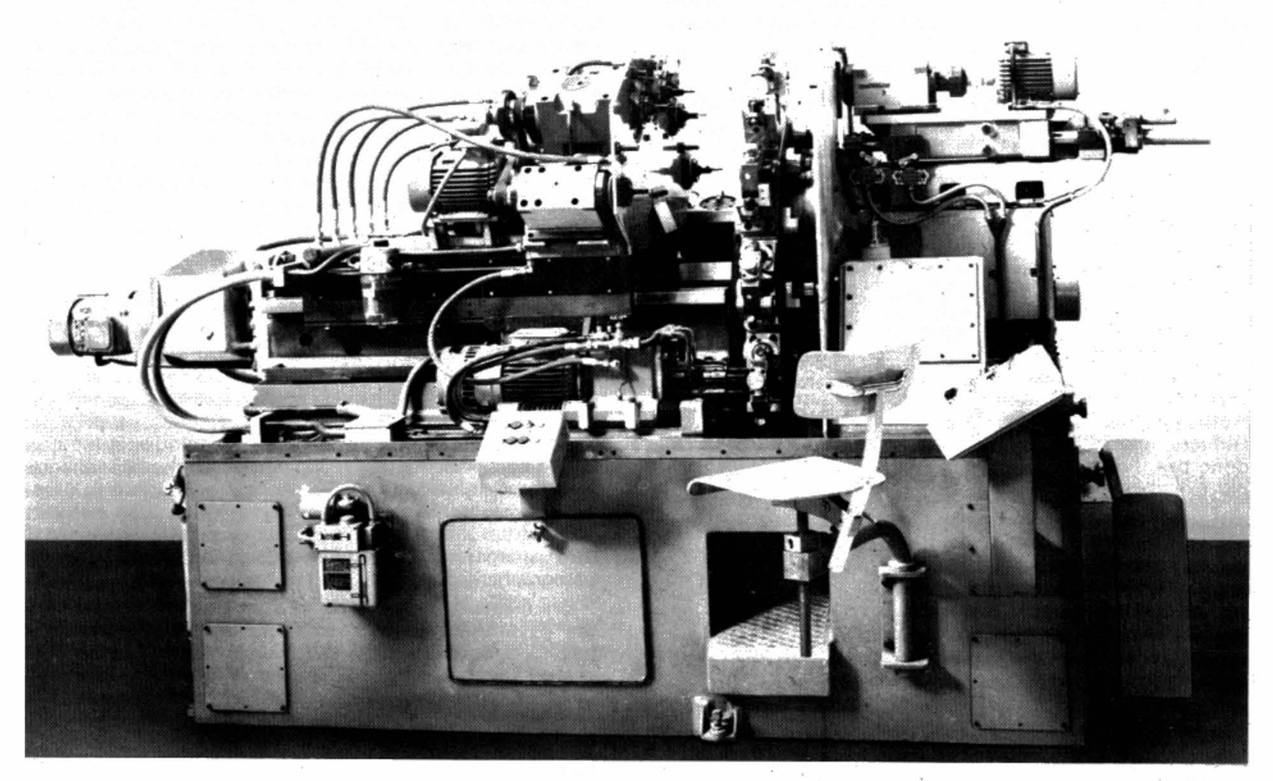
8. L'ORGANISATION DES FABRICATIONS

L'organisation des fabrications est un élément essentiel de la production dans les usines de mécanique et aucun développement sur l'usinage ne pourrait se dispenser d'en tenir compte. Deux considérations dirigent ce problème d'organisation : les considérations techniques dont l'évidence ne se discute pas et les considérations économiques et financières dont l'importance risque parfois d'échapper à ceux qui ont la charge de la production. Bien que cette partie du problème soit en dehors du sujet proprement dit de l'usinage, il a paru indispensable de lui consacrer un paragraphe spécial.

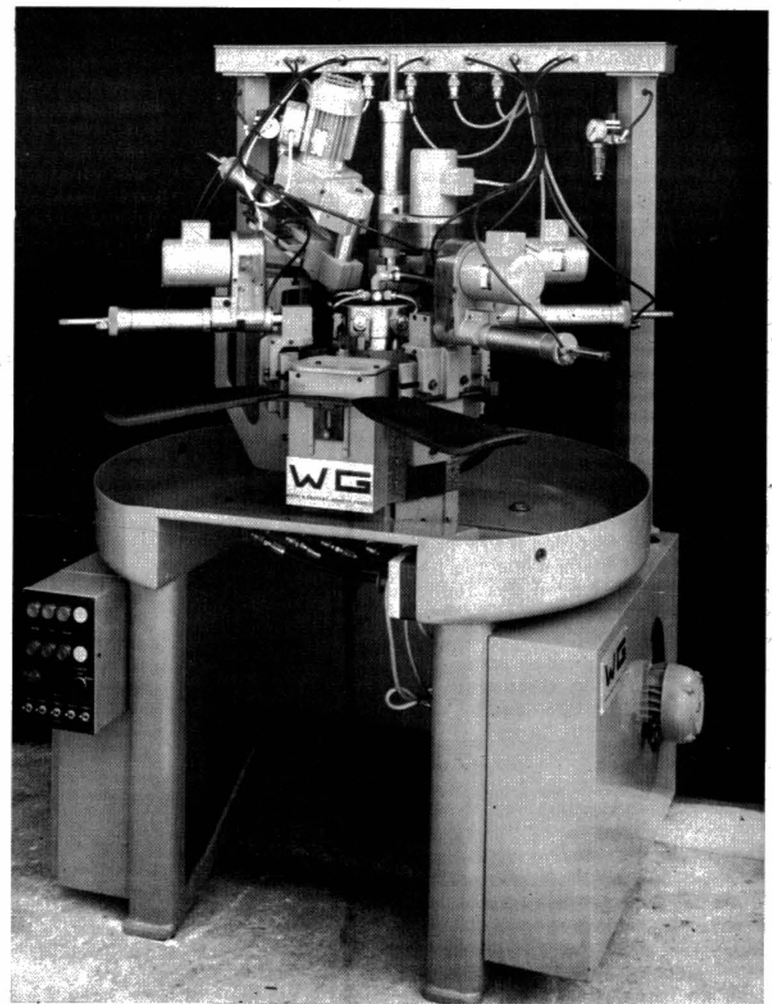
Les éléments techniques comprennent un certain nombre de phases : la préparation du travail, l'exécution du travail, le contrôle du travail. Les éléments économiques comprennent le calcul du prix de revient, puis celui du bénéfice.

8.1. La préparation du travail. — Toute pièce à fabriquer doit faire l'objet d'une préparation. Il importe de déterminer la matière première constitutive, si elle ne l'a pas été auparavant dans les libellés de la commande, et de détailler tous les éléments nécessaires à l'exécution de l'usinage. Dans les ateliers petits ou même moyens, disposant d'un assortiment réduit de machines-outils, cette phase peut être écourtée ; après examen de la pièce, on se contente alors de déterminer les opérations à exécuter (tournage, perçage, fraisage, etc.), de calculer les temps nécessaires à chacune des opérations, de déterminer les outils les mieux adaptés à ce travail et de prévoir les vérifications nécessaires une fois l'usinage terminé. L'examen d'une pièce est une opération qui demande une grande habitude de la part de ceux qui en sont chargés. Ceux-ci doivent en apprécier la forme générale et les particularités, de manière à déterminer la fabrication le mieux possible. L'une des méthodes les plus couramment adoptées consiste à utiliser l'exemple de pièces identiques (sinon complètement, du moins en partie) et déjà usinées par l'atelier. On a vu plus haut, à propos de la commande numérique pour laquelle tous les détails, même les plus infimes doivent être prévus à l'avance, que l'on s'efforçait d'établir de véritables bibliothèques de cartes perforées qu'on pouvait ensuite consulter à l'aide d'un ordinateur.

8.2. Le choix du procédé d'usinage. — L'étude ainsi faite conduit à la recherche des machines et des outils correspondant le mieux à l'exécution du travail. Dans certains cas, le choix des machines et des outils est instantané ; un cylindre s'ébauche sur un tour et se termine, s'il y a lieu, sur une rectifieuse. Mais des pièces plus complexes peuvent être usinées par différents procédés en raison soit de leurs formes, soit du nombre à produire. Avec des tours on peut percer et aléser, avec des fraiseuses on peut tourner. Le choix d'un usinage dépendra donc beaucoup aussi des machines dont dispose l'atelier et de la charge de chacune d'elles ; c'est l'une des raisons de l'importance des plannings qui permettent de voir immédiatement, d'une part, la charge des machines, d'autre part, l'avancement des commandes à une date donnée et les prévisions d'avancement pour les mois à suivre. De grands progrès ont été faits dans l'établissement de tels plannings. Leur emploi est actuellement devenu habituel ; le personnel chargé de la tenue d'un planning



Machine à plateau vertical pour usinage de corps de pompe à huile (*Renault*)



Machine transfert
à six postes
(fraisage, perçage, taraudage)
(*Éclair—Wirth & Gruffat*)

doit être très entraîné à sa tâche car un manque d'entraînement ou de vigilance se traduit par la fourniture d'informations erronées susceptibles d'avoir des conséquences regrettables.

8.3. Le choix des machines. — Quant au choix des machines en fonction des séries à réaliser, il demande également une grande attention. Le simple exemple du tournage est typique car il faut savoir à quel moment on doit abandonner le tour parallèle pour un tour semi-automatique, puis pour un tour automatique. Pour les mêmes raisons, l'intérêt de la commande numérique ne peut apparaître que si les conditions nécessaires de séries, de régularité de fabrication, de reprise de ces fabrications quelque temps après qu'elles ont été interrompues, sont bien rassemblées. Le développement relativement lent de la commande numérique est certainement dû en grande partie à l'insuffisance d'expérience de la part des préparateurs et des programmeurs. Les choix relatifs aux outillages, aux montages, etc., constituent également un élément très important du problème; les machines peuvent être munies d'outils différents et l'exemple des variétés de fraises utilisables est assez typique. Les montages permettant, notamment, l'emploi simultané de plusieurs outils, jouent un rôle également très important; en effet, le programme doit apprécier si le coût d'un montage déterminé est susceptible d'être amorti sur la commande à exécuter; ce calcul est très souvent difficile à faire, mais il est facilité si les montages peuvent être mis en réserve en prévision de commandes identiques car, dans ce cas, l'amortissement est réparti sur un plus grand nombre de pièces.

8.4. Les détails de la préparation. — Pour qu'une préparation soit complète, elle doit tenir compte de nombreux détails: moments où l'arrosage doit débuter, se ralentir, reprendre, s'arrêter, etc. Si la machine est automatique, il faut penser à l'approvisionnement en pièces ou en barres et apprécier si un seul ouvrier peut conduire plusieurs machines et combien. Les changements d'outils, s'ils sont prévus, doivent être inscrits sur la feuille de préparation. On conçoit d'autant plus la nécessité d'une préparation complète que les choix entre plusieurs solutions se présentent souvent. L'automatisation, qui réduit les temps de fabrication au minimum n'est atteinte, en général, qu'au moyen d'un équipement coûteux et difficile à régler; si le personnel qualifié risque de faire défaut, les préparateurs préfèrent parfois renoncer à l'automatisation, au moins partiellement.

Ces incertitudes, qui doivent être évidemment tranchées, sont de la plus haute importance pour l'établissement des prix de revient. Cet élément est à la base de tout prix de vente car il est un élément sûr; on peut ensuite le grever de frais généraux, de bénéfices, mais le prix matières et main-d'œuvre doit être une certitude.

8.5. Le contrôle de la fabrication. — C'est également un élément très important; il se fait au moment de l'usinage et à la fin de celui-ci. Dans le premier cas, lorsque les machines sont conduites par un ouvrier, celui-ci dispose presque toujours d'un moyen de contrôle simple, mais suffisant: pied à coulisse ou palmer, parfois un appareil amplificateur simple. Le temps perdu par ce contrôle est regagné par le fait que les pièces hors tolérances peuvent être éliminées immédiatement. Au contraire, si l'usinage est réalisé dans une chaîne, il se peut que toutes les opérations ne soient pas vérifiées au moment de leur exécution et il y a risque de passage de pièces mauvaises qu'il faudra rebuter à la fin des travaux d'usinage. Les entreprises d'une importance suffisante ont intérêt à faire effectuer des vérifications par un opérateur qualifié. Elles sont opérées sur des prélèvements de pièces à tous les stades de la fabrication et à des moments variables pendant les horaires de travail. Des théories assez récentes sur le contrôle dit statistique montrent que ces vérifications permettent d'écarter une proportion de pièces mauvaises suffisante pour que la qualité d'ensemble de la fabrication soit assurée. Ce contrôle statistique est exécuté par du personnel volant muni d'appareils simples et portatifs dont la mise au point a été une des préoccupations de ces dernières années en métrologie.

8.6. Le prix de revient. — Il reste à évoquer le problème des prix de revient, étant entendu qu'il est fait état seulement des prix matières et main-d'œuvre. Des théories très variées et très perfectionnées permettent d'établir le prix de vente à partir de cette donnée, mais leur étude, pourtant très intéressante, s'écarte trop de l'usinage pour être entreprise à fond. Par ailleurs, le prix matières étant du ressort des services chargés des achats, c'est le prix main-d'œuvre seul qui peut faire l'objet d'une étude liée de près à l'usinage. Les développements précédents ont fait état de la plupart des éléments nécessaires pour traiter la question: préparation du travail, machines-outils et outillages utilisables, contrôle des produits.

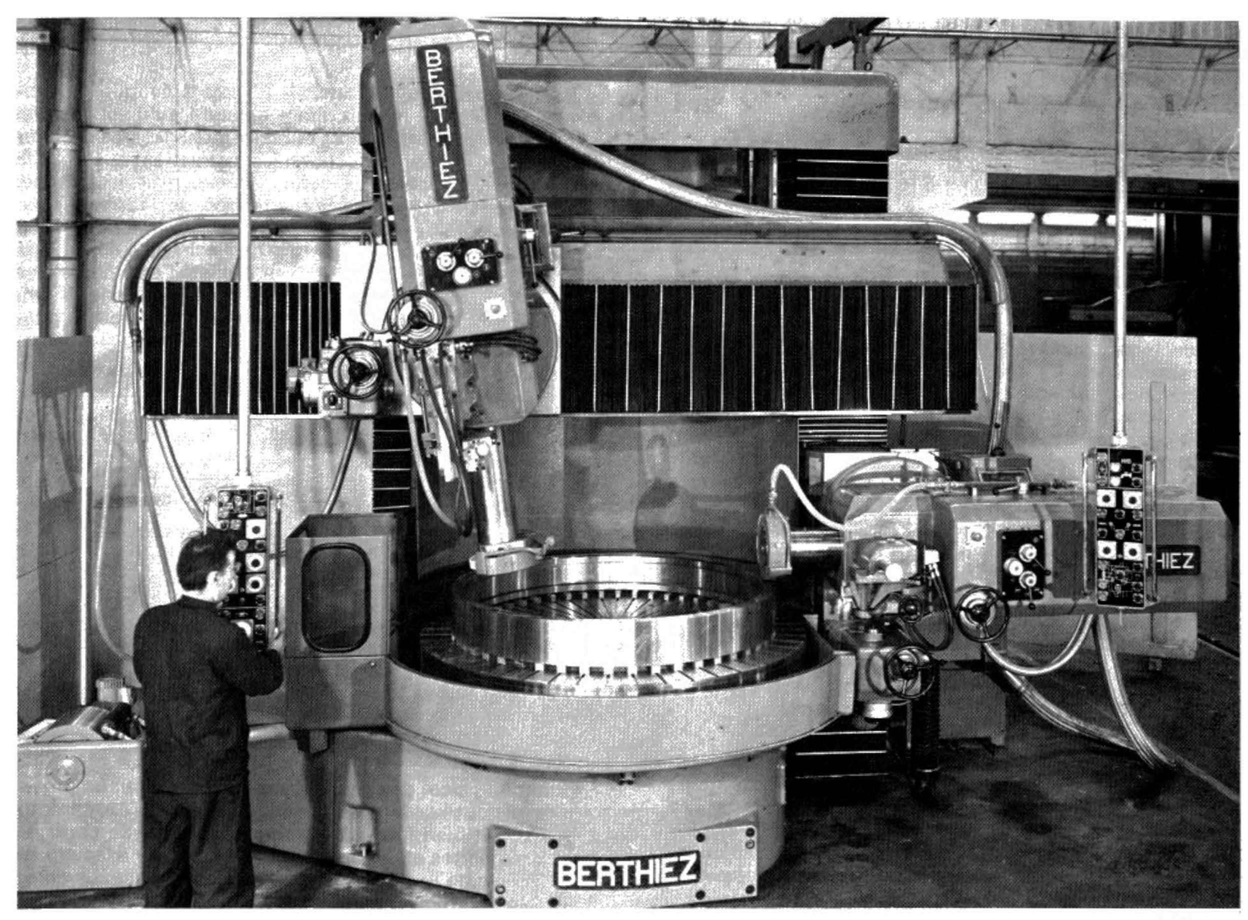
L'établissement du prix main-d'œuvre est, par conséquent, le résultat d'un choix à effectuer entre toutes ces données; il faut y ajouter la qualification du personnel dont on dispose et qui varie du manœuvre simple à l'ouvrier de haute qualification. Les choix doivent obligatoirement être faits par des personnes qualifiées qu'on appelle préparateurs, en réservant le terme de programmeurs à ceux qui établissent le programme d'usinage en langage dit « langage machine » pour l'utilisation de la commande numérique.

L'établissement du prix main-d'œuvre a, lui aussi, donné lieu à de nombreuses théories qui traitent des avantages respectifs du travail horaire et du travail au devis, cette dernière formule comportant de nombreuses variantes dont plusieurs ont pour objet de limiter l'accroissement du salaire en fonction du rendement, cela pour éviter, tout en restant dans l'équité, des erreurs de calcul de temps par trop flagrantes.

Quant au calcul des temps, base de tout calcul de prix, il repose surtout sur le chronométrage. Pour qu'un chronométrage soit bien fait et équitable, il importe de partir de données précises et, notamment, de déterminer exactement les éléments de l'usinage, en particulier les outils. Le chronométrage fait ainsi l'objet d'un premier test à partir d'éléments dont la nature est bien précisée, ensuite on vérifie à l'atelier si les données choisies sont bien exactes. Il n'est pas toujours possible, d'ailleurs, d'opérer de cette manière prudente; dans ce cas, le chronométrage doit être particulièrement soigné. Lorsqu'il s'agit de travail à la chaîne, les calculs de temps sont parfois difficiles car la chaîne prend et conserve un rythme qu'il est impossible de changer. Les prix main-d'œuvre sont alors calculés globalement selon des formules qui dépendent de chaque entreprise.

On peut ainsi constater à quel point le problème de main-d'œuvre est important. Dans certains cas, le chronométrage ou tout autre moyen mécanique permet d'avoir des bases d'appréciation assez sûres; dans d'autres cas, c'est seulement l'expérience du préparateur qui peut faire foi et c'est bien ainsi qu'on est amené à opérer dans les petits ateliers. Les théories sur le prix de revient négligent, d'ailleurs, un peu trop cette masse de producteurs dont les moyens financiers sont insuffisants pour supporter les frais généraux élevés quels qu'ils soient. Toujours est-il que les chronométrages qui entraînent un contrôle du travail des ouvriers et provoquent parfois l'irritation de ceux-ci sont évités dès qu'on le peut. Leur suppression est plus facile à réaliser dans les firmes importantes où l'automatisation plus complète et parfois totale d'une fabrication peut être atteinte. Lorsqu'il en est ainsi, les calculs de prix de revient main-d'œuvre sont considérablement simplifiés car, en dehors du travail de préparation, les temps d'usinage dépendent de la capacité de la machine automatisée ou du groupe de machines automatisées.

8.7. Cas des très grandes séries. — Les industries dont les fabrications se font en grandes séries (l'automobile est l'exemple le plus connu), ont tendance à s'équiper avec des machines qui ne sont plus exactement des machines-outils mais des groupes d'usinage équipés conformément aux pièces qu'il faut usiner et fonctionnant à une vitesse qui change très peu en cours de travail. La connaissance des temps d'usinage est alors très facile à obtenir.



Rectification d'une bague de roulement d'un mètre de diamètre par une rectifieuse verticale avec chariot sur bras incliné (*C.N.M.P.-Berthier*)

9. L'AVENIR DE L'ORGANISATION DES FABRICATIONS

Il est difficile de perfectionner beaucoup cette organisation pour les fabrications de peu d'importance qui sont exécutées dans les ateliers petits ou moyens; l'intervention humaine y sera toujours importante car une mécanisation réellement utile et pratique des moyens de préparation se heurte sans cesse au coût élevé qu'elle représenterait dans les frais généraux. Il n'est évidemment pas impossible que certaines améliorations soient apportées à l'équipement des bureaux de préparation; déjà certaines machines à calculer, d'un prix acceptable, sont adoptées dans ces services. Mais c'est évidemment à l'occasion des séries que les progrès seront les plus sensibles.

Déjà, la commande numérique, dont l'application aux séries moyennes paraît la plus rentable pour l'instant, a imposé une discipline très stricte en manière de préparation du travail et d'organisation générale. Elle est d'autant plus nécessaire que toute l'intervention humaine est impossible une fois la machine en marche, l'organisation des fabrications doit donc être totale.

Aussitôt qu'on atteint les très grandes séries, les moyens de travail s'automatisent davantage. On entre alors dans le domaine de l'informatique avec toutes les conséquences qui en résultent. On a vu déjà des ateliers entiers de fabrication de moteurs d'automobiles fonctionner presque sans personnel; on peut imaginer qu'à l'aide d'une documentation toujours plus complète sur les cas d'usinage les plus variés, mise sur fiches susceptibles d'être triées par des ordinateurs, une quantité considérable de fabrications pourra être organisée, elle aussi, sans intervention humaine. On ne devra pourtant jamais en conclure que l'intelligence de l'homme sera devenue inutile; pour l'utilisation des ordinateurs, pour l'organisation des travaux préparatoires et de la programmation, l'intervention de spécialistes restera obligatoire.

Mais les moyens matériels dont on disposera dans l'avenir provoqueront sans aucun doute une efficience toujours plus grande de la part du personnel qui sera certainement utilisé à des tâches plus nobles.

COLLAGE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

Le collage est un moyen d'assemblage des matériaux entre eux, au même titre que le vissage ou le boulonnage. Il est utilisé depuis fort longtemps. Ainsi, des statues trouvées dans les temples babyloniens avaient des yeux en pierre collés à l'aide de bitumes au fond de leurs cavités. Le collage avait tenu 6 000 ans. Des placages de bois vieux de 3 000 ans, trouvés en Grèce, montraient des traces de collage et les Romains utilisaient l'albumine du blanc d'œuf pour coller les feuilles d'or sur le bois. Plus près de nous des parchemins datant du IX[e] siècle décrivent des procédés de fabrications de colle à partir de poisson ou de corne pour coller le bois. Les colles animales, à base de déchets de tannerie, ou d'os, ont été connues et utilisées pendant près de onze siècles et sont restées l'adhésif numéro un jusqu'au début du XX[e] siècle.

Ces colles à base végétale, animale ou minérale n'avaient cependant qu'une résistance mécanique modérée et l'humidité ainsi que les variations de température avaient des effets néfastes sur l'assemblage.

La raréfaction du bois, l'extension des applications du métal et l'apparition des matières plastiques synthétiques ont entraîné une nécessité de développer des adhésifs permettant de résoudre les problèmes d'assemblages de façon à ce que ceux-ci soient satisfaisants, quels que soient les supports et quelles que soient les conditions auxquelles on les soumet.

Le collage industriel est donc une technique assez récente qui, grâce aux solutions nombreuses qu'elle apporte aux problèmes d'assemblage de matériaux différents, ne peut aller qu'en se développant.

Avant de considérer les différents types de colles qu'on peut trouver actuellement sur le marché et qui répondent à la majorité des besoins, nous allons étudier les avantages et les limitations du collage.

1. AVANTAGES DES COLLAGES

Pour un assemblage de deux pièces, surtout dans le cas de matériaux dissemblables, le collage est certainement le moyen de liaison qui offre le plus d'avantages. En effet, plutôt que de localiser l'assemblage, comme dans le rivetage ou le vissage, il est possible de faire intervenir toutes les surfaces en regard et par conséquent d'obtenir une répartition plus uniforme des contraintes. Dans le cas de liaisons métal-métal, le collage évite également de recuire localement le métal comme le ferait le soudage.

Cette répartition des contraintes entraîne, en fait, d'autres avantages du collage, notamment une meilleure résistance à la fatigue (ce qui est particulièrement important dans le cas d'assemblages soumis à des vibrations ou des flexions permanentes). L'existence de colles à la fois souples et hautement résistantes pour les joints sollicités en cisaillement, a permis de réaliser des structures métal-métal à partir de plaques très minces. Le gain de masse est particulièrement avantageux lorsqu'il s'agit de réaliser des assemblages destinés à l'industrie aéronautique.

Pour les stylistes, le collage est également très intéressant : il permet d'obtenir des surfaces uniformes aux contours plus doux, ce qui donne des produits industriels qui se vendent mieux car, à technicité égale, c'est souvent l'aspect qui détermine le choix du client.

Un avantage supplémentaire du collage est de permettre de réaliser l'étanchéité entre les parties collées, sans qu'il soit nécessaire de reprendre l'assemblage pour le traiter à l'aide d'un mastic. Dans le cas des colles à 100 % d'extrait sec, cette étanchéité peut également servir à éviter l'effet de *pile* qui se produit à l'interface lorsque deux métaux différents sont assemblés (V. t. 2, Électrochimie, chap. 4).

Pour ne pas prolonger trop longuement cette énumération des avantages du collage par rapport aux autres moyens d'assemblage disons que le principal d'entre eux est certainement la possibilité de fixer intégralement l'un sur l'autre deux matériaux de nature différente afin d'obtenir un composite qui ait les avantages de l'un et de l'autre.

2. LIMITATIONS

À moins de croire aux produits miracles il serait absurde de penser que les avantages du collage sont sans contrepartie.

Tout d'abord il n'y a pas de colle universelle et il convient de bien savoir ce qui est désiré pour un assemblage déterminé avant de chercher la colle qui convient. Nous verrons ultérieurement (V. chap. 2) quelques-uns des critères qui peuvent déterminer ce choix.

Une autre limitation est la nécessité de n'appliquer la colle que sur des surfaces propres, dégraissées et sèches. Cela est très important dans le cas de collages métal-métal « structuraux » c'est-à-dire intervenant dans des réalisations de structures, où les valeurs demandées pour les résistances au cisaillement sont très grandes.

Les pièces à assembler devront également être *pensées* au bureau d'études en fonction du collage car leur forme, et par là-même la surface mise en œuvre pour le collage, influera sur les résultats.

Ces trois limitations (choix de la colle, forme des pièces et préparation des surfaces) seront étudiées ultérieurement, mais il faut savoir qu'elles s'appliquent à toutes les colles. En plus, chaque colle ayant ses caractéristiques physiques propres, la lecture de la notice technique fournie par le

fabricant permet de connaître les propriétés de la colle qui pourraient être une gêne éventuelle : nature des solvants, toxicité des parties, conditions spéciales de mise en œuvre.

Des essais préalables permettent à l'utilisateur de se rendre compte par lui-même des avantages et des limitations de la colle choisie et par là-même de se prémunir contre des risques cachés.

3. CONCEPTION DES PIÈCES À COLLER

Lorsqu'un assemblage est réalisé, il est toujours sollicité par différentes contraintes et la figure I-1 nous montre les principales formes que peuvent prendre ces contraintes.

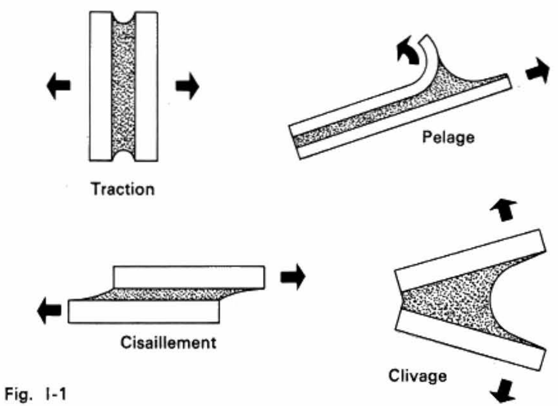


Fig. I-1

Principales sollicitations des joints de colle

Nous concevons aisément que la bonne tenue du collage ne sera véritablement assurée que lorsque toute la surface de collage travaille. Cela n'a lieu réellement que dans le cas de la traction ou du cisaillement. En effet, dans le cas du pelage seule la ligne d'arrachement est sollicitée et, dans le cas du clivage, un côté de l'assemblage est sollicité fortement tandis que l'autre ne l'est pas du tout.

Avant même de penser à choisir une colle, nous voyons tout l'intérêt qu'il peut y avoir à concevoir les pièces en s'efforçant de respecter le principe du maximum de surface collée supportant le maximum de contraintes ultérieures. Comme, en particulier, les assemblages métalliques sont rarement soumis à un seul type de contrainte, nous verrons d'après les tableaux suivants différentes possibilités de conception géométrique de joints et d'assemblages.

D'une façon plus générale, il faut concevoir le joint de la façon suivante :

a) prévoir l'assemblage pour que les contraintes s'exercent sur toute la surface collée ;

b) renforcer les pièces éventuellement pour diminuer le clivage ;

c) avoir des bords relativement souples.

3.1. Différentes sortes de joints.

— Pour comprendre la configuration des joints, il y a lieu de connaître la façon dont le joint de colle passe de l'état liquide à l'état solide. Cela peut s'accomplir de trois façons différentes suivant le type de colle :

a) par évaporation d'un solvant ;

b) par refroidissement d'un produit fondu ;

c) par polymérisation ou réaction chimique qui fait prendre en masse un mélange.

Dans le premier cas les colles sont dites à solvant, même si le solvant est de l'eau, et l'évaporation de ce « vecteur » peut s'opérer à la température ambiante.

Dans le second cas, il s'agit de colles appelées Hot-Melts et qui peuvent être des polyéthylènes, polypropylènes, polyamides, ou même des résines vinyliques. La matière est fondue, appliquée à chaud, et le durcissement se produit par refroidissement du liquide en dessous de son point de gélification. Le procédé est très utilisé en cartonnage et dans l'industrie de la chaussure.

Dans le troisième cas la réaction peut se faire par activation thermique, comme c'est le cas pour les colles nitriles phénoliques, pour certaines époxydes, et pour quelques caoutchoucs, ou bien par addition et mélange de deux produits réagissant entre eux comme c'est le cas pour des époxydes, pour des polyuréthannes, et pour des polysulfures. Le procédé sera utilisé principalement pour les assemblages métal-métal.

Pour une résistance mécanique maximale et une bonne tenue du joint, l'épaisseur du joint sera aussi faible que possible ; il faut cependant assez de colle pour égaliser les irrégularités de surface. Par ailleurs, il faut prévoir l'évaporation du solvant dans le cas des colles à solvant ou bien le retrait dans le cas des colles Hot-Melts et des colles polymérisant à chaud.

3.1.1. Joints de surfaces planes.

— Le tableau I-2 nous montre le joint droit très fréquemment utilisé mais sujet à distorsion. Nous lui préférons, lorsque c'est possible,

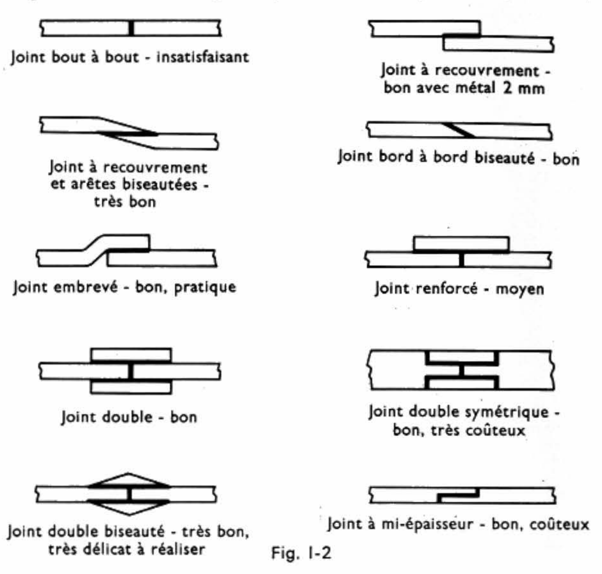


Fig. I-2

Joints à recouvrement

le joint à bord franc double ou à enture double qui nécessitent un usinage et, dans le cas de feuilles métalliques minces, un joint en biseau ou à embrèvement.

3.1.2. Renforts de surfaces planes.

— Les surfaces planes d'une certaine dimension manquent de rigidité et il faut donc les renforcer pour leur maintenir leur forme (c'est le cas par exemple des raidisseurs de capots de voiture).

Le plus simple de ces renforts est, bien sûr, le morceau de plaque collé sur la surface, mais il existe des profilés en T ou en chapeau très utilisés (fig. I-3).

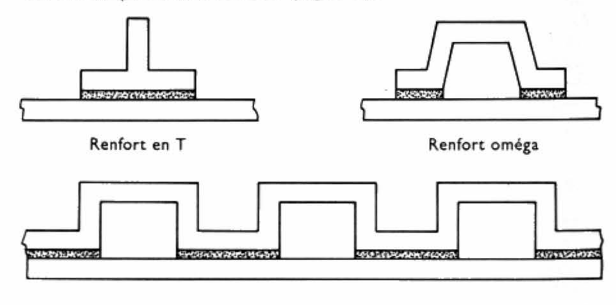


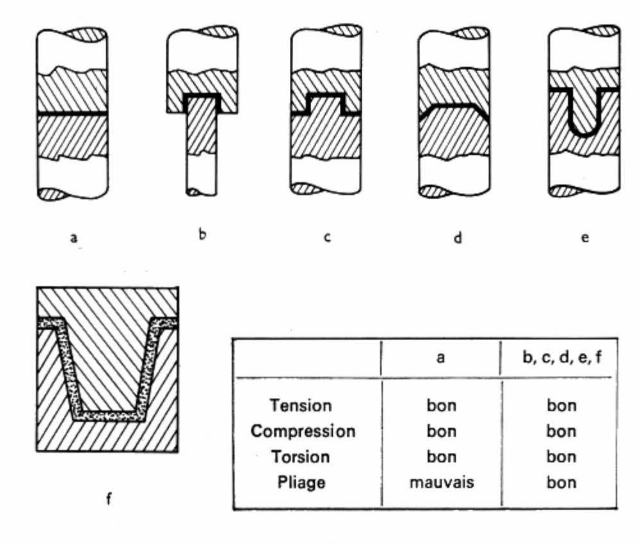
Fig. I-3 — Raidisseurs de surfaces planes. L'épaisseur du raidisseur n'est pas nécessairement la même que celle de la plaque et doit en principe être inférieure à 2 mm

D'autres renforts ondulés ou des structures en nid d'abeilles, connus en aéronautique sous le nom de NIDA, permettent d'obtenir une bonne rigidité tout en gardant une faible densité à l'ensemble.

3.1.3. Joints bout à bout. — Ces joints ne peuvent s'appliquer que pour des pièces épaisses et sont améliorés par usinage pour faire des joints à rainure et languette ou encore mieux des joints à paliers, plus rainure et languette afin de mieux contrôler l'épaisseur du film de colle (fig. I-4 et I-5).

Fig. I-4

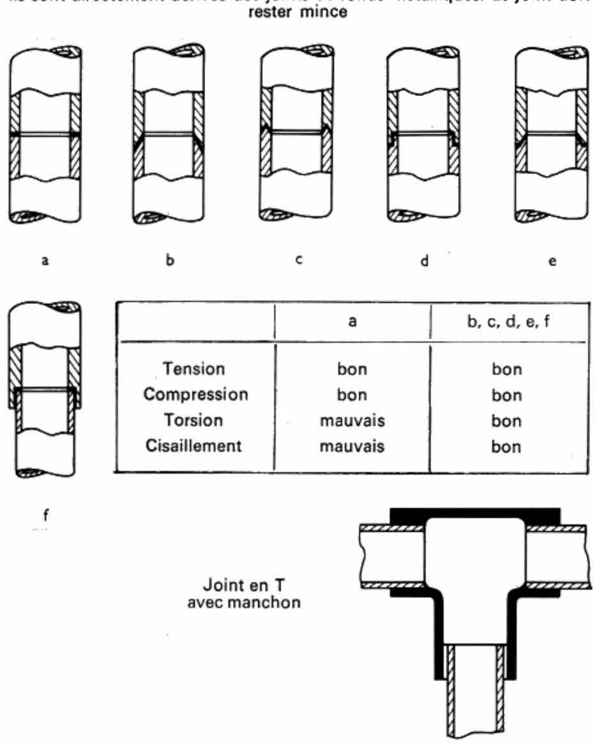
Jointage bout à bout de ronds métalliques.
Tous ces joints nécessitent
un usinage mais sont à centrage automatique



	a	b, c, d, e, f
Tension	bon	bon
Compression	bon	bon
Torsion	bon	bon
Pliage	mauvais	bon

Fig. I-5

Joints tubulaires
Ils sont directement dérivés des joints de ronds métalliques. Le joint doit rester mince



	a	b, c, d, e, f
Tension	bon	bon
Compression	bon	bon
Torsion	mauvais	bon
Cisaillement	mauvais	bon

Joint avec manchon utilisé, pour les tuyauteries d'eau ou de gaz pouvant résister jusqu'à 100 bars

3.1.4. Joints d'angle. — Le raccord de plaques à angle droit pose certains problèmes et il ne peut être résolu par collage sans le renfort d'une cornière ; cela n'est pas un handicap important car, par exemple, dans le cas des menuiseries métalliques une cornière est déjà employée pour le vissage des cadres. On rencontre en général des assemblages coulissants, à recouvrement ou à tenon et mortaise (fig. I-6 et I-7).

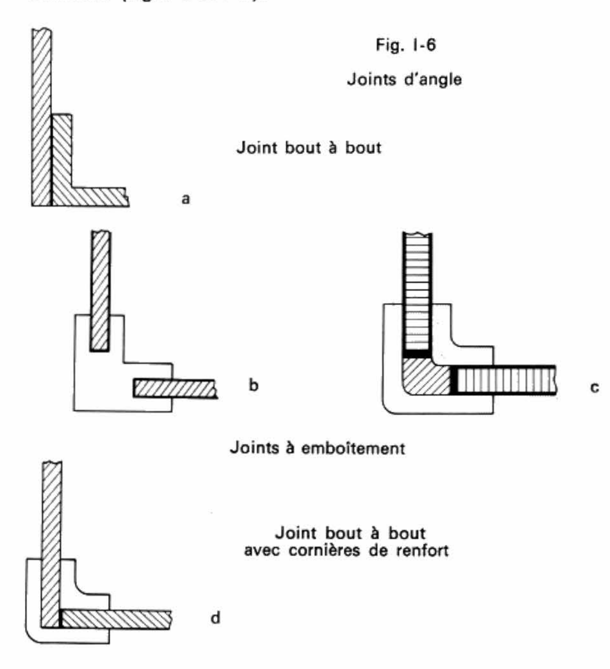


Fig. I-6

Joints d'angle

Résistance mécanique :
a = moyen, b, c et d = souhaitée

Cette nécessité de réalisation de joints permettant le collage étant exposée, nous pouvons maintenant étudier les règles de sélection de l'adhésif proprement dit.

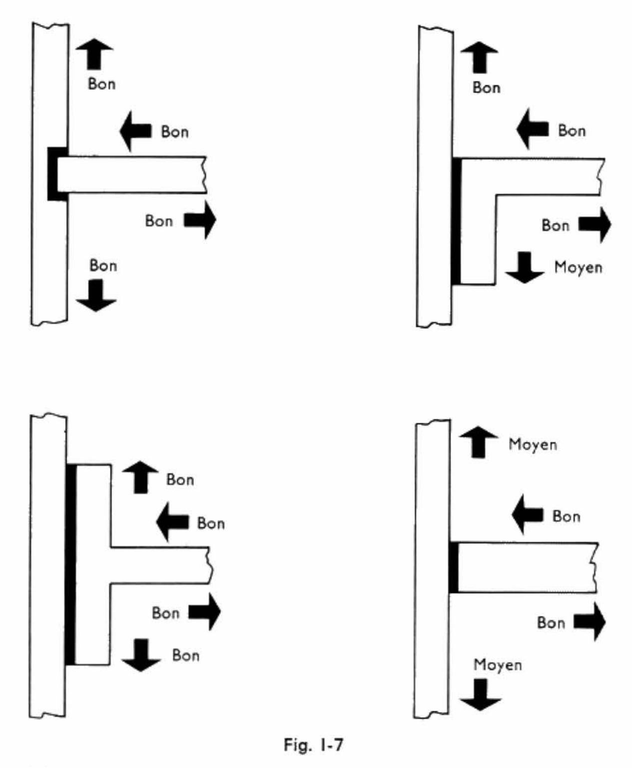


Fig. I-7

Joints à angle droit et leurs résistances en fonction des sollicitations

CHAPITRE II

SÉLECTION DES COLLES

Si, d'une façon simple, nous pouvons définir le collage comme étant l'assemblage de deux matériaux *A* et *B* à l'aide d'un matériau *C*, nous voyons clairement sur la figure II-1 à quel endroit de l'assemblage nous devrons

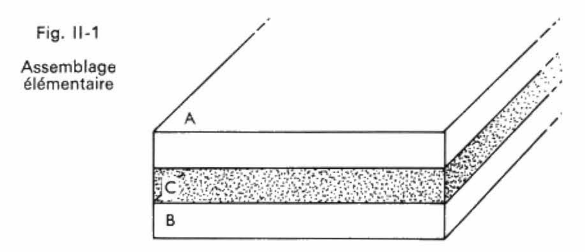


Fig. II-1
Assemblage élémentaire

porter toute notre attention : c'est aux interfaces et dans le joint de colle lui-même. Nous examinerons successivement ces deux points.

1. ADHÉSION

La condition primordiale de la fixation du film de colle *C* sur la surface *A* est le mouillage. Il ne faut pas que la colle se comporte comme du mercure versé dans un cristallisoir (le métal reste en gouttes et ne mouille pas le verre).

Si nous désignons par θ l'angle de contact entre le liquide *C* et la surface *A*, la mouillabilité maximale est obtenue pour un angle $\theta = 0$ (fig. II-2). Cette condition n'est pratiquement jamais vérifiée, mais l'angle θ peut être très faible et nous pouvons supposer qu'à l'extrême, comme une goutte d'huile déposée sur l'eau, il y a étalement maximal du film de colle jusqu'au niveau moléculaire.

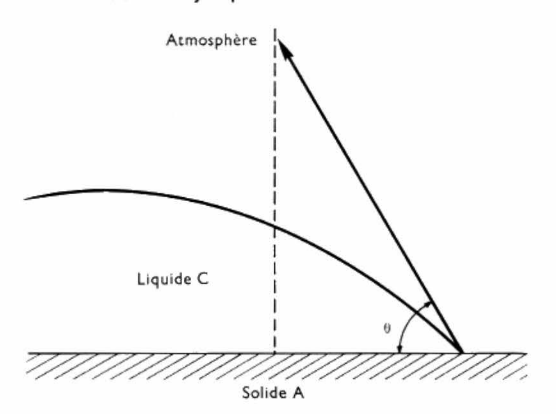


Fig. II-2 — Angle de contact. Mouillabilité

Pour une colle déterminée la mouillabilité dépend principalement de l'état de surface du matériau à encoller et nous consacrerons une part de ce chapitre aux préparations de surface.

En supposant que toutes les conditions d'une bonne mouillabilité soient réunies, c'est-à-dire que les surfaces sont propres, sèches et dégraissées, nous dirons que les forces d'accrochage qui lient *C* à *A* et *B* sont des forces d'adhésion.

Malgré de nombreux travaux scientifiques sur la question, il n'existe pas de théorie scientifique satisfaisante de l'adhésion ; plusieurs explications sont proposées et, dans la réalité, il est probable que c'est une combinaison des différentes hypothèses qui doit être retenue.

Les premières tentatives d'explication scientifique de l'adhésion remontent à une centaine d'années. J. Stephan a publié en 1874 une étude hydrodynamique qui assimile les liquides en général à des adhésifs. En se servant de disques immergés dans un liquide il avait calculé, par une équation qui porte son nom, la force nécessaire à leur séparation :

$$f = \frac{k\eta}{t}$$

où *k* dépend des disques eux-mêmes, où η est la viscosité du liquide et *t* est le temps mis pour séparer les disques. Si le temps est court la force est maximale, ce qui correspond bien à la réalité.

1.1. Adhésion mécanique. — C'est l'hypothèse la plus simple. Elle est basée sur les travaux de J. Mac Bain publiés en 1927 en Grande-Bretagne. Cette théorie s'appliquait à des substances poreuses comme le bois, le feutre ou les tissus. L'adhésion dépendait de la possibilité de pénétration de la colle dans le matériau et on considérait que le film de colle s'accrochait littéralement dans les aspérités du support (fig. II-3). Cette théorie de

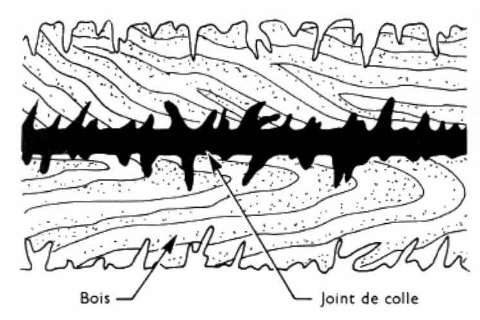


Fig. II-3 — Adhésion mécanique

Mac Bain a été remise en question par Browne et Traux qui ont fait des expériences en bouchant tous les pores de surfaces poreuses et ont cependant obtenu une bonne adhésion démontrant ainsi l'existence d'une adhésion spécifique.

1.2. Adhésion spécifique. — Nous pourrions l'appeler *adhésion de Van der Waals* puisqu'en réalité, c'est de la théorie des interactions entre les molécules que Debruyne est parti en 1939. Rappelons que lorsque deux molécules s'approchent l'une de l'autre, sans former de liaison chimique, elles exercent l'une sur l'autre une certaine attraction due à la distorsion de leurs nuages électroniques. À cette attraction vient s'ajouter éventuellement l'influence de la polarité propre des molécules (d'où le nom aussi *d'adhésion polaire* qu'on a souvent donné à cette théorie). Chaque molécule de colle agit alors comme un dipôle qui vient fixer un de ses pôles sur un pôle opposé du support (fig. II-4).

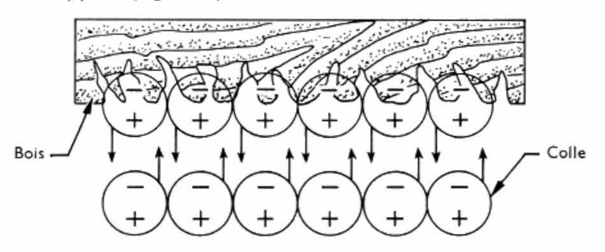


Fig. II-4 — Adhésion polaire

Debruyne ayant constaté l'existence de liquides polaires et de liquides non polaires a remarqué que les corps polaires se liaient bien entre eux mais pas avec les corps apolaires et que les corps apolaires se liaient entre eux et pas aux corps polaires. Si l'on mélange de l'eau qui est polaire avec du benzène qui est apolaire, on a une émulsion qui

se sépare rapidement en deux phases. Il y a répulsion des molécules apolaires par les molécules polaires. On peut étendre cette théorie aux interactions entre l'adhésif et le support à encoller, ce qui explique qu'il est en général impossible d'effectuer des collages résistants de substrats non polaires à l'aide de colles polaires et inversement. Cette théorie est toujours valable et a été reprise en 1951 par Mac Laren; il a tenté d'y ajouter le phénomène d'adsorption des molécules de colle par les substrats. Cette explication est douteuse tout au moins dans ses résultats pratiques et nous la passerons sous silence. En revanche, nous pouvons rattacher à cette adhésion spécifique l'explication purement électrique donnée par l'école soviétique (Deriaghin et Kratova) vers 1950. Pour cette école, la force d'adhésion est comparable à celle qui existe entre les deux plaques d'un condensateur. Le collage d'un matériau *A* sur un matériau *B* à l'aide d'un liant *C* formerait l'équivalent d'un double condensateur. Si cette hypothèse a pu être vérifiée dans le cas des métaux collés avec des polymères, elle est insuffisante dans le cas du collage de polymères entre eux. On a alors été obligé d'admettre que certains systèmes adhésifs pouvaient avoir une explication électrique, ce sont ceux à groupes polaires, tandis que les autres agissent par interpénétration, c'est ce que nous appelons l'adhésion chimique.

1.3. Adhésion chimique. — Ce mécanisme est différent des deux premiers car ici il y a réaction chimique à proprement parler entre le substrat et la colle. Il se crée alors des pontages entre les différentes molécules et l'on obtient un ensemble substrat-colle indissociable. C'est surtout le cas pour les matières plastiques.

2. COHÉSION

Après avoir examiné les différents principes de l'adhésion, ce qui nous a entraînés un peu loin de la pratique, nous constatons que ce n'est pas uniquement de l'adhésion que dépendra la résistance du collage. Chaque matériau possède en effet une structure interne plus ou moins résistante qui est due à l'assemblage de ses propres molécules. Nous appellerons cette contrainte interne, propre à chaque matériau, sa *cohésion interne*. Suivant sa nature, chaque film de colle présente une cohésion interne qui lui est propre.

3. FACTEURS INFLUENÇANT LES CARACTÉRISTIQUES DE LA LIAISON

Différents facteurs influencent les résistances mécaniques d'un joint de colle.

3.1. Durée de contact. — Tous les fabricants de colle recommandent de ne pas faire subir d'efforts aux collages avant quelques heures, voire quelques jours. Cela est particulièrement vrai dans le cas des adhésifs à base de caoutchouc. Les forces d'adhésion croissent avec le temps d'une façon asymptotique. Même les colles dites de contact suivent ce type de courbe, seule leur « montée » initiale est plus rapide et atteint 80 % de la valeur finale dans les secondes qui suivent l'accostage.

3.2. Épaisseur du film de colle. — Nous avons expliqué la différence entre adhésion et cohésion et nous voyons que la résistance au cisaillement va tout d'abord croître avec l'épaisseur du film de colle car l'adhésion est meilleure pour une épaisseur donnée et ensuite, après une

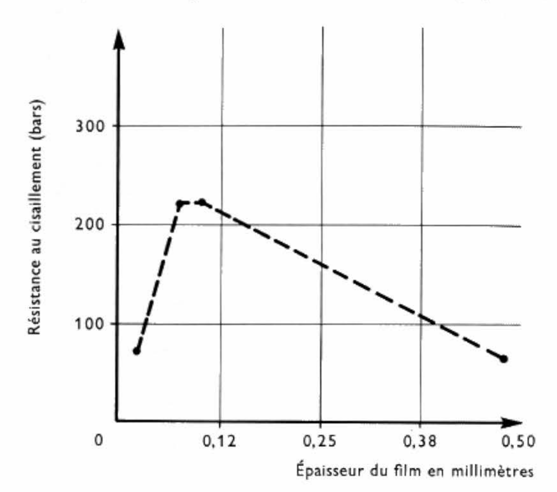


Fig. II-5

Résistance au cisaillement d'une colle néoprène

valeur à peu près constante, elle décroît (fig. II-5), la rupture de l'assemblage se produisant alors en cohésion, au sein même du liant.

3.3. Influence du traitement thermique. — Si l'on traite thermiquement un assemblage réalisé à l'aide de colle à base de caoutchouc nitrile, on constate que la résistance au cisaillement est améliorée. Dans ce cas également nous aurons une courbe en cloche, car si nous dépassons une certaine température, c'est le liant qui va avoir tendance à se décomposer et par conséquent nous aurons une rupture en cohésion.

Ces facteurs sont les principaux qui ont une influence sur les caractéristiques du joint, en plus bien entendu de l'état de surface.

CHAPITRE III

PRÉPARATION DE SURFACE

La colle doit être appliquée sur une surface chimiquement propre afin d'assurer au film de colle un bon mouillage du substrat. Si la résistance mécanique recherchée n'est que moyenne, par exemple pour la fixation de feutre sur du métal, un simple dégraissage au solvant ou à la vapeur peut être suffisant.

En général trois types de procédés de préparation sont utilisés, soit seuls, soit combinés :

a) préparation mécanique ;
b) préparation physique ;
c) préparation chimique.

1. PRÉPARATION MÉCANIQUE

Dans le cas de métaux à assembler il y a lieu de retirer la couche superficielle d'oxyde qui recouvre ces métaux. Si le métal a une épaisseur suffisante, il est possible de procéder par sablage ou par grenaillage ; dans les autres cas il faut utiliser éventuellement des abrasifs appliqués, montés sur ponceuses. Le type d'abrasif à employer est fonction de la nature du substrat à abraser.

La préparation mécanique n'est pas suffisante en soi et elle doit être accompagnée de l'une des deux préparations suivantes.

2. PRÉPARATION PHYSIQUE

On nettoie la surface à l'aide d'un solvant non gras en changeant fréquemment de chiffon afin de ne pas rapporter de la graisse sur les parties déjà nettoyées et en évitant de replonger le chiffon souillé dans le solvant propre, ce qui le contaminerait.

Un autre procédé consiste à dégraisser la pièce en l'ex-

posant à des vapeurs de trichloréthylène ou de perchloréthylène, ce qui est très efficace mais peut être exclu pour certains matériaux plastiques ou pour des raisons de sécurité car les vapeurs de ces deux corps sont toxiques. Dans ce cas, on veille à ce que le condensat de vapeurs chargées de graisse ne contamine le solvant pur.

3. PRÉPARATION CHIMIQUE

Afin de parfaire les deux traitements précédents il peut être nécessaire d'effectuer une préparation chimique de la surface. Cela est nécessaire pour atteindre des résistances au cisaillement très grandes comme, par exemple, pour la préparation des feuilles d'alliages d'aluminium utilisées dans la construction aéronautique (fig. III-1). Dans ce cas il est en effet impératif que l'on soit certain de la bonne mouillabilité de la surface car du collage dépend la sécurité de dizaines voire de centaines de vies humaines.

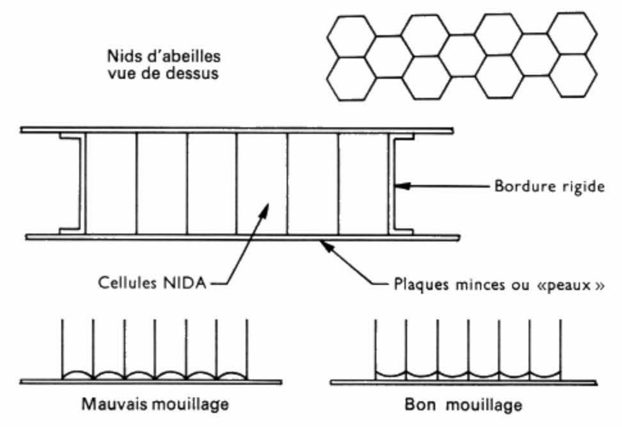


Fig. III-1 — Collage de structures alvéolées

Le métal est trempé dans des bains acides ou alcalins, rincé puis séché avant l'application de la colle. Le bon résultat de la préparation peut être contrôlé à l'aide d'un film d'eau qui se nappe régulièrement sur une surface propre tandis qu'il se forme des gouttelettes sur une surface sale (fig. III-2). Nous allons donner ci-après quelques préparations chimiques de surfaces. Ces méthodes ne sont certainement pas uniques mais sont données à titre d'exemples.

3.1. Acier. — Après la préparation mécanique et physique, absolument nécessaire pour éliminer les particules d'oxyde et la graisse, le décapage peut être fait de la façon donnée ci-après.

— Immersion des pièces pendant 2 à 4 minutes dans une solution maintenue à 15-20 °C contenant 10 parts en volume d'acide sulfurique concentré, 10 parts d'acide nitrique concentré et 80 parts d'eau (il est recommandé d'ajouter l'acide dans l'eau et non l'inverse pour éviter des projections dangereuses) ;

— rinçage ;

— polissage en trempant pendant 30 secondes à 1 minute dans une solution maintenue à 15-20 °C contenant 50 à 60 parts en volume d'acide chlorhydrique concentré, 2 parts d'eau oxygénée à 30 % et 38 à 48 parts d'eau ;

— rinçage à l'eau chaude et séchage.

Le collage doit être fait immédiatement ou il faut enduire de primaire pour éviter l'oxydation.

3.2. Acier inoxydable. — Immersion pendant 15 minutes dans une solution chauffée à 60-70 °C contenant 35 parts en volume d'une solution saturée de bichromate de sodium et 100 parts d'acide sulfurique concentré ; rinçage à l'eau courante et séchage.

3.3. Aluminium. — Le caractère amphotère de l'aluminium laisse le choix entre le dégraissage alcalin et le dégraissage acide. Dans l'aéronautique les deux sont pratiqués successivement.

— *Dégraissage acide.* — Trempage des pièces à traiter pendant 10 minutes dans un bain chauffé à 65-70 °C contenant une solution composée de 30 parts pondérales d'eau distillée, 1 part de bichromate de sodium et 10 parts d'acide sulfurique concentré (le mélange se fait dans l'ordre cité) ; rinçage à l'eau distillée et séchage à l'air sec.

— *Dégraissage alcalin.* — Trempage des pièces pendant 10 minutes dans un bain chauffé à 80-90 °C contenant 75 g d'*oakite* 164 par litre d'eau distillée ; rinçage immédiatement après à l'eau distillée et séchage.

3.4. Chrome. — Après dégraissage au solvant, attaque en immergeant pendant 1 à 15 minutes dans une solution chauffée à 90 °C contenant 50 parts pondérales d'acide chlorhydrique concentré et 50 parts d'eau distillée ; rinçage complet dans un flot d'eau distillée ou désionisée et séchage à l'air chaud.

3.5. Cuivre et alliages. — Après un dégraissage au solvant ou à la vapeur, polissage en plongeant pendant 15 secondes dans un bain à 15-20 °C contenant de l'acide nitrique concentré ; rinçage complet et encollage immédiat. La couleur verte des sulfates de cuivre doit avoir disparu avant le collage.

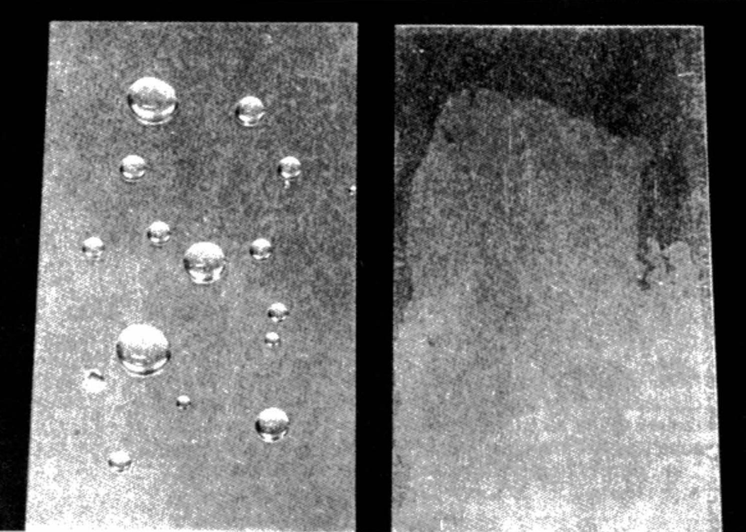


Fig. III-2

Contrôle visuel du nettoyage de la surface (*3 M*)

Surface mal nettoyée — Surface propre

3.6. Magnésium et alliages. — Après dégraissage, immersion pendant 10 minutes dans une solution chauffée à 60-70 °C contenant 95 parts pondérales d'eau distillée,

2,5 parts de métasilicate de sodium, 1,1 part d'hydroxyde de sodium, 1,1 part de pyrophosphate trisodique et 0,3 part de *naccanol* NR ; rinçage et séchage à une température maximale de 60 °C.

3.7. Zinc et métaux galvanisés. — Après abrasion et dégraissage classique, immersion pendant 2 à 4 minutes dans une solution à température ambiante contenant 20 parts pondérales d'acide chlorhydrique concentré et 80 parts d'eau distillée ; rinçage à l'eau distillée ou désionisée froide et séchage pendant 20 à 30 minutes à 65 °C. L'application de la colle doit être fait aussitôt.

3.8. Verre et glace. — Après un dégraissage complet immersion du verre pendant 10 à 15 minutes à température ambiante dans une solution composée d'une part pondérale de trioxyde de chrome et de 4 parts d'eau distillée ; rinçage abondant à l'eau distillée et séchage à 90 °C pendant 30 minutes. L'adhésif appliqué sur le verre encore chaud donne les meilleurs résultats.

3.9. Matières plastiques et caoutchouc. — Pour ces matériaux on ne procède pas à des attaques chimiques de surface car une attaque aux solvants est généralement suffisante pour avoir une bonne activation de la surface.

Lorsque la surface préparée n'est pas utilisée immédiatement pour le collage il est pratiquement indispensable d'appliquer une couche de primaire d'accrochage. C'est en général un mélange de résines synthétiques en solution peu concentrée dans un solvant. Le primaire est appliqué en couche très mince, de préférence par pulvérisation, et le film ainsi étendu joue le rôle d'une barrière de protection contre une possible oxydation. Ce primaire est de plus très réactif à la fois avec la surface préparée et avec la colle employée ; cela augmente les résistances mécaniques de l'ensemble après collage.

CHAPITRE IV

LES COLLES

1. PARAMÈTRES DE CHOIX D'UNE COLLE

Le premier paramètre qui détermine le choix de la colle est la nature des matériaux à assembler. En effet, d'après ce qui précède, si nous avons à fixer du feutre sur une plaque de métal, il est inutile de rechercher une colle qui ait une adhésion supérieure à la cohésion interne du feutre.

Le second paramètre est le milieu ambiant dans lequel l'assemblage doit être placé. En effet, si par exemple l'assemblage réalisé risque de se trouver aspergé d'huile ou d'essence, comme c'est le cas pour des toiles antidérapantes fixées sur le sol d'un garage ou d'un atelier, il faut choisir une colle résistant bien aux huiles et solvants.

Les possibilités d'application, de chauffage et de pression de l'assemblage sont autant de paramètres qu'il faut prendre en considération. Chaque cas précis de collage détermine en fait le nombre de paramètres importants ou secondaires qu'il y a lieu de retenir. Il est par conséquent impossible d'en faire une liste exhaustive. Il faut toutefois noter que le choix final de la colle à employer résulte d'un compromis entre les différents paramètres et que le choix réel est fonction du coût envisagé et des performances demandées. En étant trop strict sur une propriété physique déterminée on risque d'éliminer une colle à moindre coût qui aurait donné entière satisfaction par ailleurs.

2. DIFFÉRENTES COLLES

On distingue quatre catégories principales de colles :

a) les *colles végétales ou animales* déjà connues depuis longtemps ;

b) les *colles minérales* telles que le silicate de soude utilisé en cartonnerie ;

c) les *colles à base d'élastomères* naturels ou synthétiques, la plupart du temps présentées en phase solvant ;

d) les *colles à base de résines,* thermoplastiques (elles fondent à la chaleur comme les *hot-melts*), ou thermodurcissables (elles durcissent à la chaleur).

Nous nous bornerons à étudier ici quelques types de colles qui peuvent convenir pour des collages de métaux, soit sur différents matériaux soit entre eux. C'est dans cette dernière catégorie que nous trouverons les colles métal-métal appelées également colles *structurales* puisqu'elles participent réellement à l'élaboration de structures.

3. COLLES STRUCTURALES

Un classement des colles structurales est assez difficile à établir car les transitions entre les différents types de colles ne sont pas toujours très nettes. Les colles dites « à froid » peuvent également être utilisées à chaud et même si nous voulons nous fier aux types chimiques, de nombreuses colles sont obtenues par des mélanges de plusieurs corps chimiques pour varier leurs propriétés.

Nous présenterons donc les colles d'après leur aspect physique : colles liquides deux parts, colles liquides une part, colles en films.

3.1. Colles liquides deux parts. — De nombreuses colles deux parts ont vu le jour depuis le début du siècle : d'abord tous les composés du phénol ou du formol, puis les époxydes, les polyesters et les polyuréthannes.

Toutes ces colles sont composées de deux produits chimiques qui réagissent entre eux lorsqu'on les mélange et polymérisent en se réticulant. Suivant les produits, la réticulation est plus ou moins forte et par conséquent la rigidité finale aussi. Le caractère rigide a pu être atténué en réalisant des mélanges entre ces résines et des polymères à longues chaînes qui sont des résines thermoplastiques.

3.1.1. Colles phénoliques vinyliques. — Ces colles connues sous le nom de *redux* existent sous plusieurs formes, en solution alcoolique une part, en film ou en colle deux parts, comme nous les considérons dans le cadre de ce paragraphe.

La surface à coller est recouverte de la partie liquide de la colle puis on saupoudre avec la partie poudreuse (formal polyvinylique). Après élimination de l'excès de poudre on laisse évaporer l'alcool encore contenu dans ce mélange poudre-liquide. Ce séchage peut durer de 3 à 48 heures à la température ambiante. Ensuite, après accostage des pièces, on cuit entre 140 et 180 °C sous une pression de 4 à 7 bars pendant une durée inversement proportionnelle à la température (cette durée est comprise entre 5 et 60 mn).

Nous donnons à titre indicatif la courbe de résistance au cisaillement du *redux* 775 en fonction de la température.

Des colles à froid en deux parts à base de résine formol-phénol existent également. Le durcisseur acide provoque une réaction poussée de polycondensation et les résistances au cisaillement sont proches de 100 bars lorsque le film de colle est complètement formé. Ces colles présentent une bonne résistance à l'humidité mais ont l'inconvénient d'être en général très colorées et tachantes. Leurs performances mécaniques, bien que suffisantes pour certaines applications industrielles, sont maintenant trop faibles pour les exigences de l'aéronautique.

3.1.2. Colles résorcinol-formol. — Ces colles, encore très employées il y a quelques années, ont tendance à être remplacées car la production de résorcinol est insuffisante. Elles sont surtout employées dans les col-

lages de structures en bois. Elles se présentent en deux parts, le durcisseur étant en général à base de soude. Le mélange résine-durcisseur est d'abord évaporé, comme dans le procédé *redux*, puis on opère une cuisson éventuelle à 80 °C pendant 5 minutes.

Les résines phénoliques pures ne peuvent polymériser à froid sans l'action d'un catalyseur très fortement acide ce qui limite leur emploi; de plus elles sont de couleur foncée et tachantes. Les colles résorcinol-formaldéhyde ont donc comblé une lacune en permettant d'avoir des colles polymérisables à température ambiante, sensiblement neutres, n'attaquant pas les fibres de bois et donnant des liaisons aussi résistantes que les résines phénoliques polymérisées à chaud.

Dans le cas de collage métal-bois, où l'on est obligé de travailler à température ambiante, il est absolument impératif de passer un primaire élastomère-phénolique sur le métal et de cuire celui-ci. En effet, si les colles résorcinol-formaldéhyde n'adhèrent pas sur un métal, même très propre, elles s'accrochent facilement et durablement sur un primaire convenablement cuit. Cette cuisson du primaire est très délicate et doit être soigneusement contrôlée: un manque de cuisson risque de se traduire par un ramollissement et un pelage lors de l'application de l'adhésif en solution (solvant), tandis qu'une cuisson trop poussée ne permet plus l'adhérence de la colle sur le primaire.

3.1.3. Colles urée-formol et aminoplastes. — Toujours utilisées dans la réalisation de composites bois-matière plastique, ces colles ont l'avantage d'être incolores, inodores et de ne pas être inflammables. Elles sont sensibles à l'humidité mais sont relativement bon marché, ce qui explique leur grande diffusion.

Dans le cas des résines urée-formol, la polymérisation est obtenue par addition d'un catalyseur acide ou à fonction acide. La plupart du temps ce catalyseur est un sel d'ammonium qui permet une vitesse de réaction compatible avec le collage. En plus on ajoute un agent tampon pour que la réaction à température ambiante ne soit pas trop rapide. Ce tampon a également pour rôle d'éviter que la colle ne soit trop acide sur sa surface de liaison ce qui risquerait d'aller à l'encontre des propriétés adhésives.

On ajoute fréquemment aux colles urée-formol de la mélamine qui est une résine en elle-même et qui donne alors à la colle une meilleure résistance à l'eau. Les colles à la mélamine peuvent être utilisées seules. Elles résistent à l'eau bouillante, et présentent une grande résistance mécanique. Leur pH est neutre. Elles permettent un long temps de travail.

3.1.4. Colles époxydes ou époxy. — Les colles époxydes en deux parts se mélangent au moment de l'emploi. Le mélange est utilisable pendant un temps déterminé appelé *temps de travail*. La résine de base est obtenue par polycondensation d'épichlorhydrine et d'un composé phénolique. Le durcisseur est variable : pour les colles *à froid* il est à base de polyamines ou de mélange polyamines-polyamides et pour les colles *à chaud*, à base d'anhydrides d'acides ou de mélanges polyamines-anhydrides d'acides.

Ces colles, dont le mélange peut être facilité si les deux composants sont de couleur différente, présentent des avantages importants. Elles permettent en effet de déplacer les pièces jusqu'à leur position définitive avant de leur appliquer une pression d'accostage. Cette pression d'accostage est simplement destinée à maintenir en place les éléments à fixer pendant le temps de durcissement de la colle. Elle peut être obtenue à l'aide d'instruments classiques tels que des pinces de serrage ou un ruban adhésif renforcé.

Le temps de prise est variable suivant la colle employée.

Pour les colles *à froid*, il est à noter que le temps de prise peut être fortement réduit s'il est possible de chauffer à 60 °C l'assemblage préparé. Les résistances mécaniques n'en sont que meilleures. Cependant, dans ce cas, disparait, l'avantage d'une colle ne nécessitant aucun apport de chaleur extérieure. Bien que ces colles soient à 100 % d'extrait sec, lorsqu'on les polymérise par chauffage, il peut se produire un léger retrait (voisin de 1 %) dû aux différents coefficients d'expansion thermique des matériaux en présence. Dans le cas d'un durcissement à des températures supérieures à 60 °C il est donc important de savoir qu'une élévation de température provoque une polymérisation plus rapide et, en même temps, un retrait plus important, cause des tensions internes plus grandes. Un abaissement de la température de cuisson, dans les limites tolérées par le fabricant, provoque les effets contraires.

Lorsque les colles époxy deux parts sont stockées dans de bonnes conditions, c'est-à-dire à l'abri de la lumière et à 15-25 °C, leur conservation est très bonne. Par mesure de sécurité il est préférable de ne pas dépasser le temps de péremption indiqué par le fabricant car les durcisseurs de résines époxy ont tendance à se décomposer.

Les époxy présentent un grand nombre d'avantages du fait de leur pouvoir d'adhésion lié à leur formule chimique qui comporte des groupes polaires libres de différentes sortes :

$$-\mathrm{OH} \quad \mathrm{C}-\mathrm{C}-\mathrm{NH_2} \quad (\text{C}-\text{C pontés par O})$$

La cohésion de ces résines est très grand et s'il y a rupture d'un collage, c'est en général au sein même d'un des substrats.

Composées de 100 % d'extrait sec, ces colles se polymérisent dans des endroits cachés sans poser de problème d'évacuation des volatils. Cela entraîne un faible retrait des joints de colle, une faible tension interne et une plus grande résistance mécanique.

Leur résistance au glissement, c'est-à-dire à un cisaillement sous charge constante, est très grande. De plus, elles présentent une bonne tenue en présence d'humidité ou de solvants tout en étant de bons isolants électriques et thermiques. Commes les résines précédentes on peut les mélanger à d'autres corps de synthèse pour modifier leurs propriétés physiques.

3.1.5. Polyuréthannes. — Présentées en deux parts, ces colles se composent d'une base polyester ayant des radicaux alcool OH libres et d'un durcisseur de type polyisocyanate ayant des groupes N = C = O libres.

Les deux produits mis en contact dans des proportions déterminées donnent un film de colle plus souple en général que les films obtenus avec les résines époxy. Cette souplesse, qui peut être recherchée pour certaines applications, est cependant obtenue avec des valeurs de résistance au cisaillement plus faibles que pour les résines précédentes (pour cette raison on les appelle souvent colles *semi-structurales*). Cette même propriété entraîne l'excellente résistance à la fatigue des assemblages.

Ces colles dont l'adhésion sur polyester et sur métaux est très bonne ont cependant l'inconvénient d'avoir des durcisseurs assez toxiques et très sensibles à toute trace d'humidité. En effet les isocyanates sont décomposés par l'eau et même à l'état de joint cette sensibilité à l'eau est toujours existante; on obtient des baisses de résistance au cisaillement après immersion dans l'eau.

3.2. Colles liquides une part. — Dans certaines applications, les appareillages nécessaires au mélange précis des colles à deux composants sont à proscrire et on a recherché des colles « une part » qui puissent donner des résultats comparables aux mélanges (fig. IV-1). Ces colles,

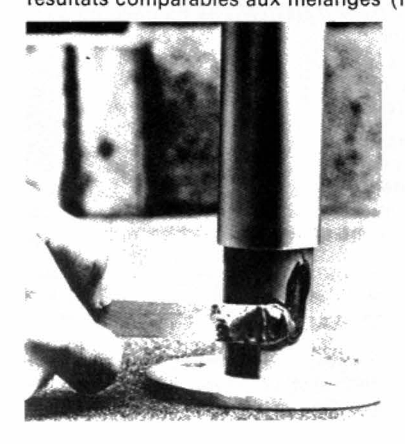


Fig. IV-1

Assemblage d'une balustrade par collage (*3 M*)

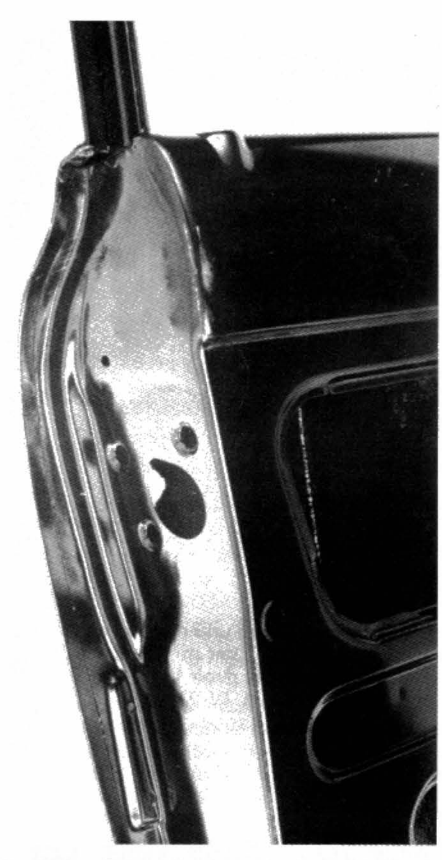
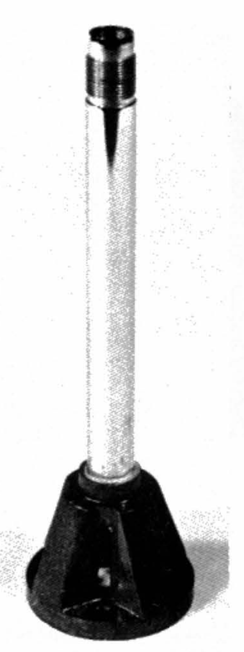


Fig. IV-2 — Collage d'une porte sur la contre-porte à l'aide d'une colle structurale. La polymérisation de la colle se fait en même temps que la cuisson des peintures (*3 M*)



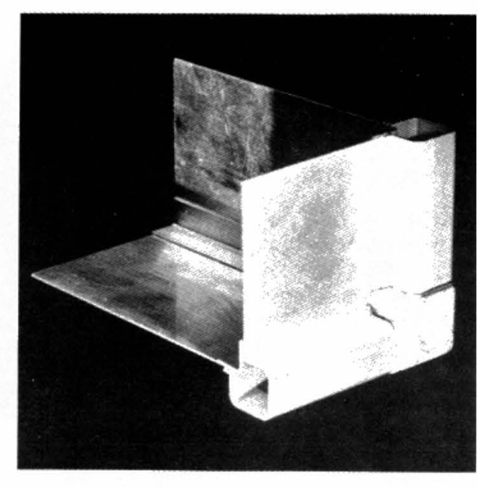


Fig. IV-3 — Collage de renforts d'angles de conteneur à l'aide de colle Schotch-Weld une part (*3 M*)

Fig. IV-4 — Le collage de cet axe en acier dans une bague en bakélite a avantageusement remplacé un filetage et un taraudage (*3 M*)



Fig. IV-5

Extrusion de colle époxy une part (*3 M*)

tout comme les films que nous présentons ultérieurement, ont la propriété d'avoir un cycle de polymérisation qui peut être arrêté avant et durant leur stockage puis, qui peut à nouveau se dérouler sous l'action de la température et de la pression.

3.2.1. Époxy. — Modifiées ou non, ces colles nécessitent un apport de chaleur pour polymériser. Lors de la fabrication du produit, on ajoute un accélérateur qui n'agit qu'à une température déterminée (fig. IV-2). La viscosité de la pâte augmente graduellement dans le temps car il se produit une lente réaction qu'on peut réduire en stockant le produit en chambre froide.

Lorsqu'on applique l'adhésif il n'y a pas à craindre de dégagement gazeux lors de la polymérisation (la colle est formée de 100 % d'extrait sec). Il n'y a pas non plus besoin d'exercer une pression autre qu'une pression d'accostage des pièces pour éviter une éventuelle déformation (fig. IV-3 et IV-4). Si nous prenons comme exemple la EC 2214 N nous notons les avantages suivants :

— Températures de service de — 57 °C à + 93 °C.

— Polymérisation complète en 40 minutes à 120 °C (le temps peut être réduit en augmentant la température).

— Pas de fluage pendant la polymérisation.

— Pas de départ de matières volatiles pendant la polymérisation.

— Application aisée.

— Excellent vieillissement.

Les essais effectués sur des joints réalisés avec ce type de colle selon les spécifications militaires MMM-A-132 type 1 classe 3 montrent une résistance au cisaillement à température ambiante supérieure à 300 bars et des éprouvettes soumises aux essais de fatigue à température ambiante ne présentaient aucune trace de rupture au niveau du film de colle après 1 million de cycles.

Cette colle a de nombreuses applications industrielles : il est seulement nécessaire d'avoir un cycle de cuisson adapté et d'éviter d'inclure de l'air dans la colle lors de l'application, ce qui donnerait un joint poreux (fig. IV-5).

3.2.2. Cyanoacrylates. — Ces colles, découvertes après 1950, ont la particularité d'être un liquide qui ne durcit qu'à l'abri de l'air. De faible viscosité elles peuvent s'infiltrer dans des cavités très petites pour y assurer fixation et étanchéité. Ces résines anaérobiques peuvent être stockées aisément, mais, en contrepartie, elles ne peuvent être utilisées que pour des assemblages dont les tolérances sont assez serrées (sinon il n'y a pas prise). Leur polymérisation est accélérée lorsque l'un des deux substrats à assembler est un métal qui agit alors comme catalyseur. Elles ont de nombreuses applications dans les industries mécaniques : fixation de bagues sur carters, étanchéification de soudures poreuses, fixation de joints à lèvres ou d'écrous sur des filetages. Les résistances au cisaillement obtenues vont de 5 bars à 250 bars environ, ce qui exige de les choisir soigneusement suivant l'usage qu'on en attend.

3.3. Colles en films. — Les colles en films sont actuellement les produits les plus « sophistiqués » qui existent sur le marché. Elles peuvent être « supportées » ou non, c'est-à-dire que le film de colle peut éventuellement englober un support en fibres tissées ou non.

Le gros avantage des films par rapport aux colles liquides en une ou deux parts est que la couche de colle qui va

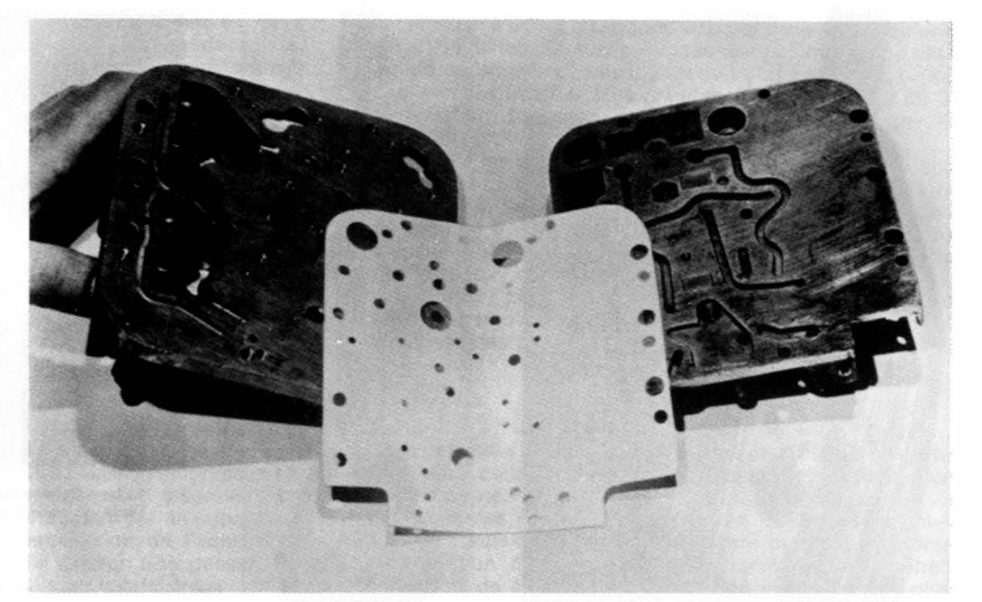


Fig. IV-6

Collage de deux demi-coquilles moulées à l'aide de film A F 111 (*3 M*)

former le joint est soigneusement calibrée (fig. IV-6). C'est le type de colle que l'on utilise le plus dans les réalisations aéronautiques car c'est lui qui donne le plus grand coefficient de sécurité.

3.3.1. Films de colle phénoliques-vinyliques. — Afin d'éviter l'opération fastidieuse d'enduction et de saupoudrage du procédé *redux*, une présentation du produit est faite en film. Cette forme de colle donne une bonne résistance pour la réalisation de panneaux sandwich comportant des structures métalliques alvéolées en nids d'abeilles. Après une préparation convenable des substrats, une couche de primaire est appliquée sur la tranche des alvéoles pour faciliter le mouillage par le film de colle lors de l'opération de cuisson sous pression (V. fig. III-1). La remontée de la colle, rendue fluide par l'élévation de température, est facilitée par les phénomènes de capillarité le long des parois des cellules.

3.3.2. Films nitriles-phénoliques. — Ces colles à base de caoutchoucs nitrilacryliques et de résines phénoliques se cuisent dans les mêmes conditions de température et de pression que les phénolvinyliques c'est-à-dire environ 1 heure à 175 °C sous une pression de 7 à 10 bars. Leur résistance en température est supérieure aux *redux* ce qui permet de les utiliser pour des réalisations d'avions volant à des vitesses supersoniques. Leur stockage étant recommandé entre 0 et + 5 °C, pour une conservation d'environ 6 mois, il y a lieu de les laisser revenir à la température ambiante dans un endroit sec pour éviter les phénomènes de condensation sur les parties froides.

Ces films sont à la fois thermoplastiques et thermodurcissables. Ils se ramollissent en surface vers 80-100 °C et sont plastiques vers 120-130 °C. C'est à ce moment que le mouillage des surfaces s'effectue et il faut alors bien maintenir l'assemblage sous pression pour aider la colle à mieux mouiller. Cette phase de mouillage est brève et les résines contenues dans le mélange amorcent leur thermodurcissement que l'on prolonge pendant une heure vers 160-200 °C suivant les produits. Lors de la réaction de cuisson il se libère quelques molécules d'eau qui se vaporisent, aussi la pression exercée doit-elle être supérieure à la pression de vapeur de l'eau. Ce phénomène peut expliquer certains collages poreux obtenus lorsque la pression n'est pas suffisante. Sur la courbe donnant la pression de vapeur d'eau en fonction de la température on peut noter que vers 170 °C la pression à appliquer est voisine de 10 bars.

Pour obtenir une résistance maximale, il est souvent bon de préchauffer les pièces afin d'éviter des contraintes parasites et des glissements dus à la dilatation des pièces pendant la montée en température du cycle de cuisson. De toute façon on recommande de faire une montée en température progressive, voisine de 5 °C par minute, pour qu'un équilibre thermique puisse toujours avoir lieu entre les pièces à jointer et le film de colle (fig. IV-7).

Nous voyons sur le graphique ci-après que la résistance au cisaillement a une croissance très rapide dans les cinq premières minutes du cycle de cuisson puis qu'elle augmente très peu à partir de 15 minutes, la courbe étant alors asymptotique (fig. IV-8). Dans le cas présent, il s'agit d'un échantillon d'un film AF 30 (3 M) polymérisé à 175 °C sous 10,5 bars de pression (la pression de vapeur corres-

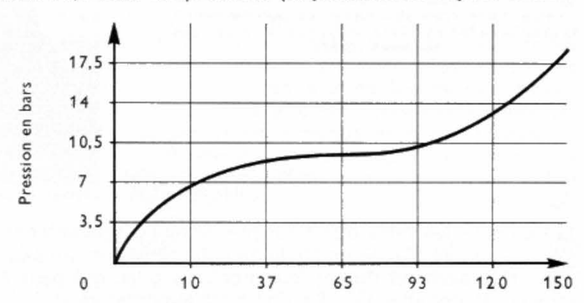
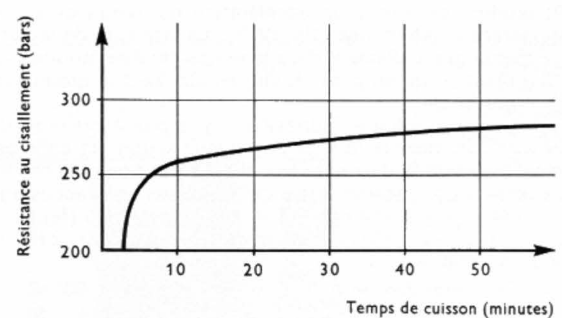


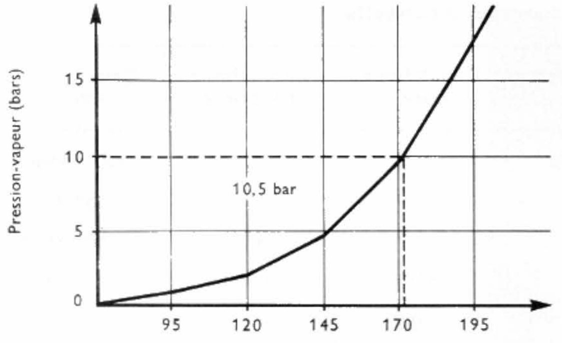
Fig. IV-7 — Variation de la pression en fonction de la température pour un film AF 30 lors d'une montée en température voisine de 5 °C par minute



Temps	Résistance
2 mn 30	210 bars
5 mn	253 bars
10 mn	261 bars
20 mn	265 bars
60 mn	274 bars

Fig. IV-8

Résistance au cisaillement en fonction du temps de cuisson à 175 °C



Températures (degrés Celsius)	Pressions absolues (bars)
95	0,79
120	2
145	4,71
170	9,45
195	17,40
220	29,60

Fig. IV-9

Variation de la pression de vapeur en fonction de la température pour un film AF 30

pondant à cette température est indiquée sur la figure IV-9).

Le cycle habituel recommandé pour ce produit est une pression minimale de 7 bars (100 PSI) appliquée dès le départ et pendant toute la durée du cycle, une montée en température jusqu'à 175 °C à raison de 5 °C/mn, cuisson pendant 60 minutes et redescente à 100 °C avant relâchement de la pression.

3.3.3. Films époxy. — Les résines époxy seules ayant tendance à donner des joints très résistants mais très cassants, il a été nécessaire de les modifier en les alliant soit avec des résines phénoliques (films époxy-phénoliques comme l'AF 130 de la société 3 M), soit avec des polyamides comme le nylon. On a obtenu des films plus souples, alliant de bonnes résistances au cisaillement à une certaine souplesse du joint, tels les films nylon-époxy, utilisés en aéronautique ; ce sont les meilleurs pour des utilisations en continu à des températures voisines de 120 °C (fig. IV-10 et IV-11).

Au point de vue application et polymérisation, ces films nécessitent bien entendu une très bonne préparation de surface et une manipulation extrêmement soigneuse afin de ne pas contaminer la surface du film. Les premiers films de ce type nécessitaient une cuisson de une heure à 175 °C alors que les films plus récents nécessitent seulement une température de 120 °C et un temps de polymérisation inférieur à une heure.

4. COLLES NON STRUCTURALES

Nous avons surtout envisagé jusqu'alors les colles métal-métal où les contraintes portées sur le joint sont en général élevées. Cependant pour certaines applications on a simplement besoin de fixer un élément métal et un matériau différent, et il suffit alors que la cohésion interne du film de colle soit supérieure à celle du plus faible des deux matériaux. Des colles à base solvant peuvent alors être utilisées. Il est à noter d'ailleurs que pour certaines applications elles sont préférables à des colles structurales tout en présentant une résistance au cisaillement semblable. En effet, on modifie certaines colles à solvant à l'aide de résines de type phénolique pour les rendre plus rigides et thermodurcissables.

Les colles modernes non structurales peuvent être à base de caoutchouc ou de résines synthétiques et très souvent d'une composition des deux. Pour les colles à base de caoutchouc nous donnons dans le tableau ci-après les caractéristiques propres des principaux caoutchoucs. Ces

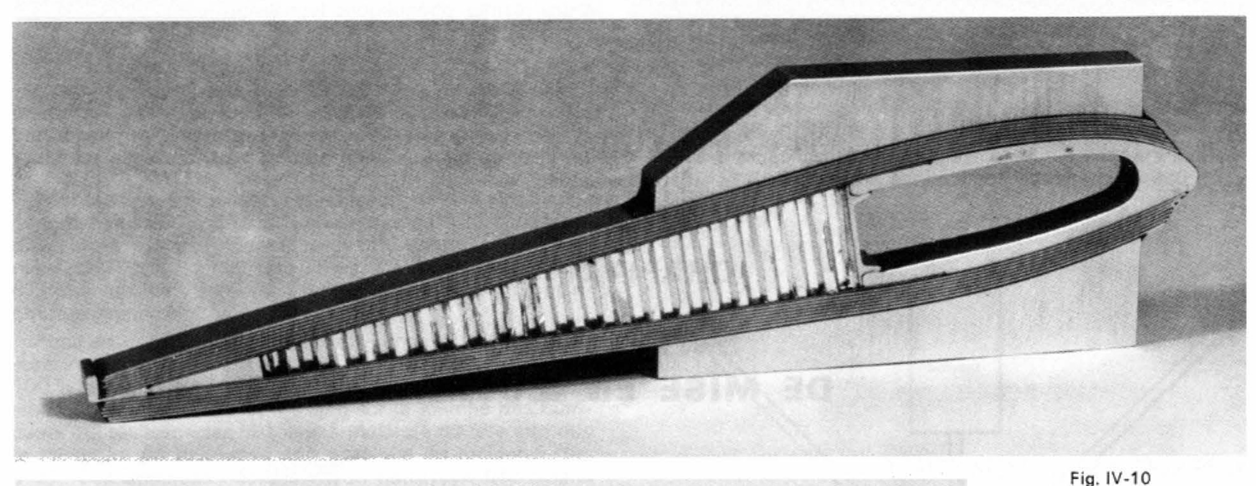


Fig. IV-10

Coupe d'une pale d'hélicoptère collée (*3 M*)

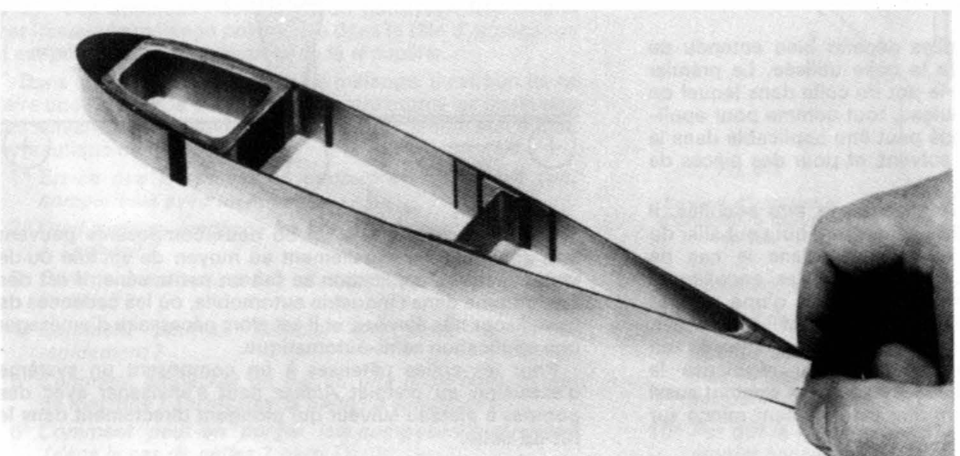


Fig. IV-11

Coupe de pale d'hélicoptère avec les renforts collés (*3 M*)

Propriétés des différentes familles d'adhésifs

	Caoutchouc régénéré	Caoutchouc S.B.R.	Caoutchouc butyl	Caoutchouc néoprène	Caoutchouc nitrile
Résistance aux ultraviolets	moyenne	moyenne	très bonne	bonne	très bonne
Résistance à l'ozone	faible	moyenne	excellente	bonne	faible
Résistance aux huiles	faible	faible	faible	moyenne	bonne
Résistance aux essences	faible	faible	faible	moyenne	bonne
Résistance aux aromatiques	faible	faible	faible	faible	moyenne
Résistance aux alcalis	mauvaise	mauvaise	bonne	moyenne	moyenne
Résistance aux acides	mauvaise	mauvaise	bonne	faible	bonne

caractéristiques se retrouvent dans les colles de même nature et peuvent servir de base lors d'un choix.

Pour les colles à base solvant, l'application a lieu sur des surfaces propres et dégraissées. On enduit les deux surfaces que l'on veut assembler et on laisse évaporer le solvant jusqu'à ce que le film de colle n'attache plus aux poils du dos de la main. L'assemblage se fait alors immédiatement en pressant les faces encollées l'une contre l'autre.

Pour les surfaces poreuses, comme le bois ou les panneaux agglomérés, il est parfois nécessaire de passer une deuxième couche de colle lorsque la première a été complètement absorbée par le substrat.

Deux autres méthodes dites par réactivation sont également utilisables avec certaines colles :

a) *réactivation au solvant.* — La colle est enduite sur les surfaces à assembler et on la laisse sécher pendant plusieurs heures à l'abri de la poussière et de l'humidité. Lorsqu'on veut réaliser l'assemblage on passe rapidement un chiffon légèrement imbibé du solvant correspondant à la colle et on assemble immédiatement en pressant ;

b) *réactivation à la chaleur.* — Dans ce cas la couche de colle séchée est chauffée, ce qui la ramollit pendant un moment court mais suffisant pour que l'assemblage se fasse en pressant.

Nous citerons à titre d'exemple quelques colles à solvants utilisées dans des applications avec le métal.

4.1. Colles à base de caoutchouc régénéré ou S.B.R. — Elles suffisent pour permettre un bon accrochage de matériaux poreux sur métal et peuvent être utilisées dans le cas de collage de feutre ou de liège sur métal par exemple.

4.2. Colles à base de caoutchouc polychloroprène. — Ces colles présentant un très bon vieillissement aux agents atmosphériques servent à faire des panneaux sandwich (un métal à l'extérieur et du bois ou des matières plastiques à l'intérieur). Elles sont utilisées dans la construction de panneaux de façade par exemple.

4.3. Colles à base de caoutchouc nitrile. — Elles résistent particulièrement bien aux huiles et aux solvants et peuvent même, dans certains cas, être employées comme revêtement intérieur de réservoirs à carburants. Additionnées à des résines phénoliques leur tenue en température peut dépasser 120 °C.

4.4. Colles à base de résine polyuréthanne. — Elles ont l'avantage de bien adhérer sur métal et sur la plupart des matières plastiques en général. Le joint formé est plus souple que celui obtenu à partir de résines vinyliques.

CHAPITRE V

MATÉRIELS DE MISE EN ŒUVRE

1. MATÉRIEL D'APPLICATION

La mise en œuvre des colles dépend bien entendu de l'application envisagée et de la colle utilisée. Le premier mode qui vient à l'esprit est le pot de colle dans lequel on trempe un pinceau ou un rouleau, tout comme pour appliquer une peinture. Ce procédé peut être applicable dans le cas de colles très fluides, à solvant, et pour des pièces de taille moyenne.

Dès qu'une surface plus grande devra être encollée, il faut concevoir un équipement plus élaboré qui peut aller du pistolet à peinture à des encolleuses dans le cas de fabrications industrielles de grande série. Ces encolleuses peuvent être de type « à rideau » à partir d'une trémie : on laisse couler la colle sur le substrat à encoller. Lorsqu'on veut calibrer l'épaisseur de colle déposée on peut adjoindre un système de racle qui régularise le niveau (fig. V-1). Des encolleuses à rouleaux existent aussi qui permettent de déposer un film extrêmement mince sur une grande surface.

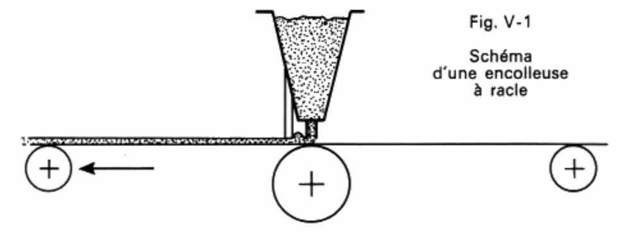
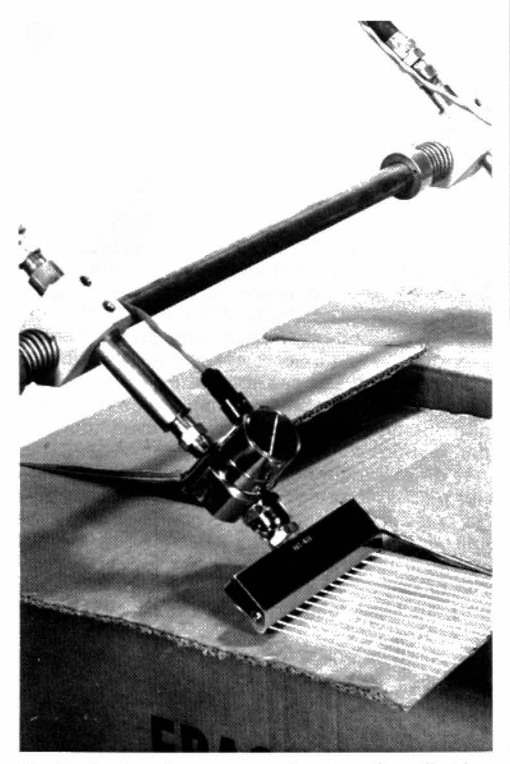


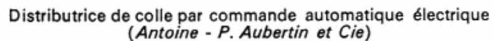
Fig. V-1
Schéma d'une encolleuse à racle

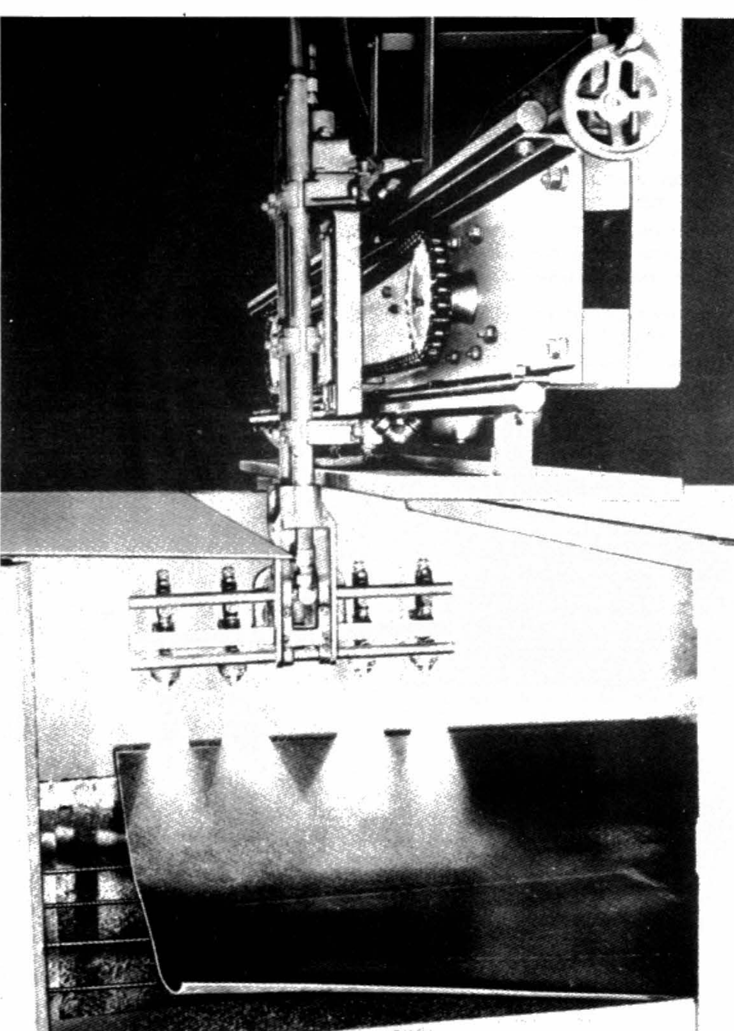
Les colles pâteuses à un ou deux composants peuvent être appliquées manuellement au moyen de spatule ou de racle, lorsque l'application se fait en petite série. Il est des cas, comme dans l'industrie automobile, où les cadences de travail sont très élevées, et il est alors nécessaire d'envisager une application semi-automatique.

Pour les colles pâteuses à un composant un système d'extrusion au pistolet *Airless* peut s'envisager avec des pompes à plateau suiveur qui plongent directement dans le fût de colle.


Encolleuse automatique à pulvérisation (*3 M*)




Distributrice de colle par commande automatique électrique (*Antoine - P. Aubertin et Cie*)



Pour les colles présentées sous forme de film réactivable ou polymérisable à chaud, un découpage à la dimension des pièces est seul nécessaire avant l'opération de polymérisation proprement dite. Seul les films permettront d'obtenir un joint de colle d'une épaisseur uniforme et rigoureusement contrôlée.

Pour les colles deux parts il faut concevoir des équipements qui permettent un mélange. Comme ces colles sont à 100 % d'extrait sec c'est une véritable installation d'extrusion qui est nécessaire et il existe sur le marché des fabricants qui réalisent des pistolets à mélange *en tête* afin que le minimum de tuyauterie soit porteuse du mélange (fig. V-2). Ces appareils nécessitent un nettoyage très soigné car lorsque le mélange polymérise dans la tête d'application il est pratiquement impossible de la récupérer.

Dans le cas d'application ou de mélange, il est bon de se faire une liste guide et de se poser entre autres les questions qui suivent, avant d'investir dans un équipement électrique, hydraulique ou mécanique :

1° *Est-ce que les pièces en contact avec l'adhésif sont compatibles avec lui ?*

2° *Quel système empêche les corps étrangers de se mêler à l'adhésif ?*

3° *Comment est maintenue et contrôlée la viscosité de l'adhésif ?*

4° *Comment peut-on détecter un défaut et purger rapidement ?*

5° *Comment empêcher un gel ou une prise dans la tête de machine ? (envisager la panne d'électricité).*

6° *Comment peut-on purger les composants séparés ? (dans le cas de colles 2 parts).*

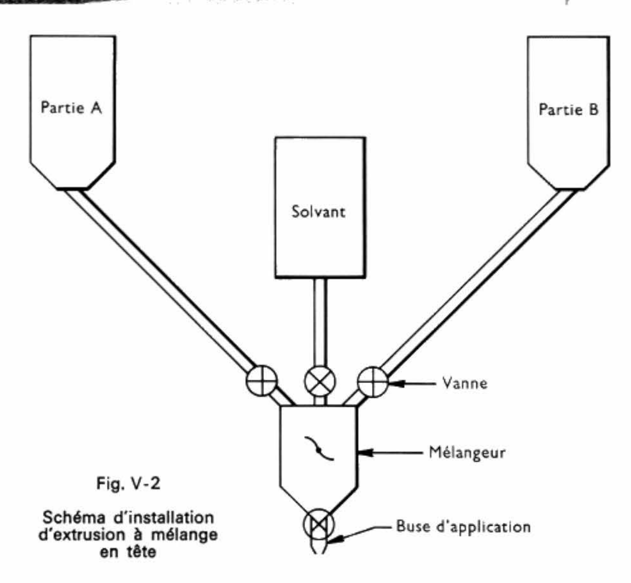


Fig. V-2

Schéma d'installation d'extrusion à mélange en tête

7° *Comment vérifier les proportions du mélange ?*

8° *Y a-t-il des jauges de température ?*

9° *Quelles sont les pièces de la machine qui s'usent le plus — moyen et coût de la réparation — moyen de contrôler l'usure ?*

10° *Par qui la machine peut-elle être utilisée (manœuvre, ouvrier spécialisé, agent de maîtrise, ingénieur) ?*

11° *En cas de panne, quel est le service après-vente assuré — y a-t-il un schéma de la machine et une liste des pièces détachées ?*

12° *Que contient la garantie (bien en lire les termes) ?*

13° *Les pièces d'usure rapide sont-elles livrées en double avec la machine ?*

14° *Peut-on compter sur le constructeur pour l'assistance au démarrage ?*

15° *A-t-on vraiment besoin de cet équipement — va-t-il permettre d'économiser de l'argent ou augmenter les cadences de production ?*

La dernière question est fondamentale : elle doit être posée dès le départ. Rien ne sert en effet d'avoir en bout de chaîne une machine ultra-moderne si le reste ne peut pas suivre.



Fig. V-3

Pressage de panneaux sandwich (*3 M*)

2. MATÉRIEL DE CUISSON OU POLYMÉRISATION

Lorsque la colle est appliquée et que l'assemblage est accosté, certaines colles exigent un apport de chaleur extérieure afin d'atteindre l'état final de film de colle joignant deux substrats. Cet apport de chaleur va de pair avec une mise sous pression de l'assemblage. Les trois facteurs intervenant pour les collages structuraux sont en effet le temps, la température et la pression.

Une installation peut se présenter sous différentes formes qui doivent donc :

— comporter une source de chaleur et de pression,

— pouvoir maintenir une pression constante pendant le cycle de vulcanisation ou de polymérisation,

— maintenir l'uniformité de la pression sur toutes les faces du collage (fig. V-3).

Dans tous les cas le rapport temps-température s'applique au plan du collage et pour tous les réglages il faudra disposer de thermocouples au niveau du film.

La pression à appliquer va de la simple pression d'accostage à la pression nécessaire pour éviter les dégagements de matières volatiles comme dans le cas des films caoutchouc-résines phénoliques. En tout cas il faut que la pression soit constante quel que soit l'état du film. Il faut donc surveiller cette pression à l'aide de manomètres précis puisque nous avons vu que les films passaient par un état liquide avant de durcir. L'ensemble de ces trois facteurs peut s'obtenir dans des autoclaves et des presses chauffantes (fig. V-4). Bien qu'encombrants les autoclaves ont souvent de gros avantages par rapport aux presses chauffantes car ils ne présentent pas de gradients de température ou d'effets de bords. Pour les pièces de formes compliquées, il est possible d'appliquer la pression en mettant la pièce dans une sorte de sac souple, étanche et résistant à la chaleur. On fait alors le vide dans le sac dont les parois s'appliquent uniformément sur la pièce. On place ensuite le sac dans l'autoclave où l'on peut alors faire croître la température et la pression (fig. V-5).

Il faut bien enregistrer les températures au niveau du film de colle à l'aide de thermocouples car le thermomètre d'ambiance de l'appareil utilisé ne donne pas toujours une image exacte de la température réelle au niveau du joint.

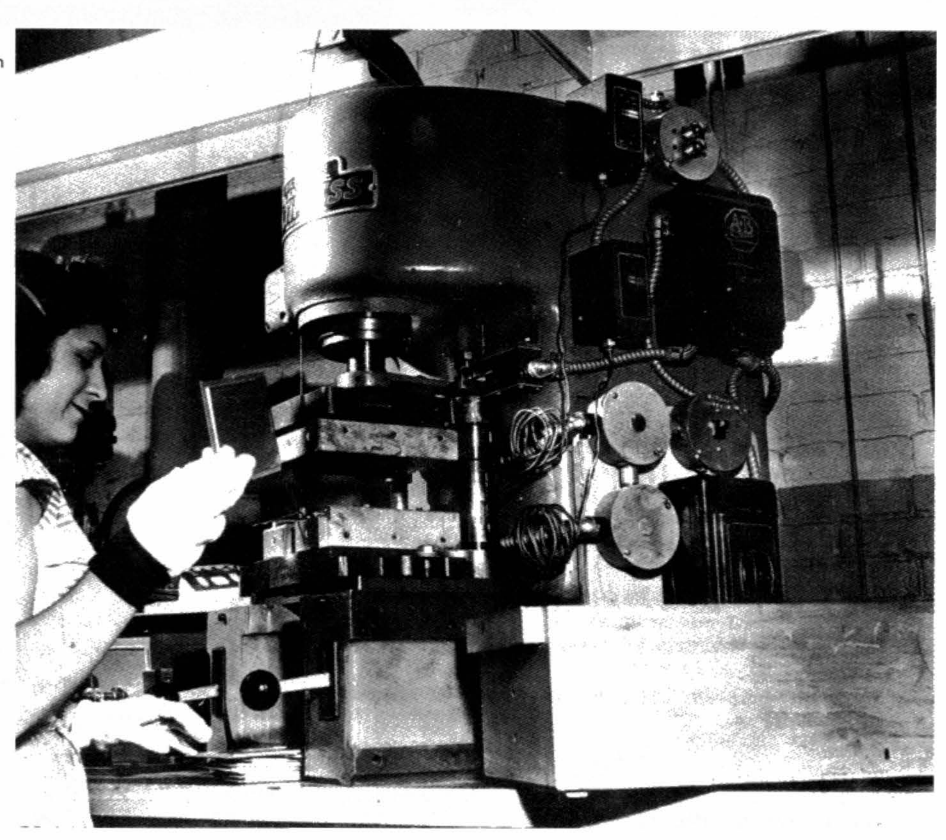


Fig. V-4

Presse chauffante pour collage par réactivation thermique (*3 M*)

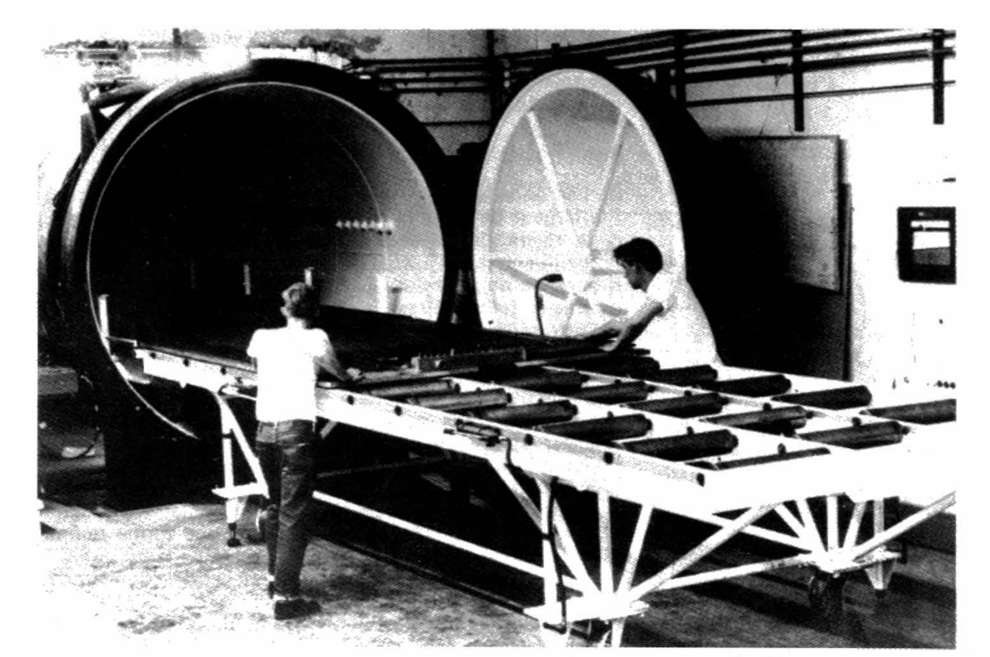


Fig. V-5

Autoclave permettant de polymériser sous pression

D'autres systèmes de cuisson du film sont utilisés; certaines cuissons se font très rapidement à températures élevées au moyen d'un chauffage par ultrasons que l'on peut localiser au film lui-même. On peut également utiliser un système de chauffage par pertes diélectriques, couplé avec un système de pression mécanique (V. t. 2, Électrothermie). Ces deux systèmes sont couramment utilisés actuellement, entre autres, dans l'industrie automobile pour des collages verre-métal.

3. MÉTHODES DE CONTRÔLE

Lorsqu'un assemblage est réalisé, il est souvent nécessaire de le tester pour vérifier si sa résistance mécanique a la valeur désirée. Malheureusement, quel que soit le moyen d'assemblage utilisé il est pratiquement impossible de réaliser des essais qui ne soient pas destructifs.

En premier lieu on peut cependant multiplier les contrôles visuels à chaque étape de l'assemblage, lors de la préparation de surface, lors de l'application de la colle et après la polymérisation. Un contrôleur averti déterminera souvent un défaut de collage à l'œil. En plus, il pourra utiliser des contrôles vibratoires ou sonores en tapant la pièce avec un petit marteau métallique. Basés sur le même principe, il existe des appareils de contrôle à ultrasons. Des ondes sonores à haute fréquence sont introduites dans l'assemblage et on étudie le comportement des vibrations à chaque endroit de l'assemblage (V. t. 2, Ultrasons).

Une autre méthode (développée par la société Perkin-Elmer) met en œuvre un système de contrôle thermique en enregistrant le spectre d'émission infrarouge de la partie chauffée. Les essais non destructifs n'étant en général pas suffisants, on utilise également des essais destructifs que l'on effectue sur des échantillons (fig. V-6 a, b, c). Ainsi on fabrique des éprouvettes de cisaillement conformes aux normes ASTM (fig. V-7 et V-8). On réalise également des éprouvettes de pelage que l'on utilise avec un appareil des Forest Products Laboratory qui consiste en un tambour

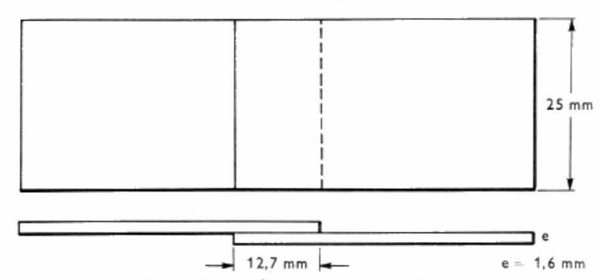
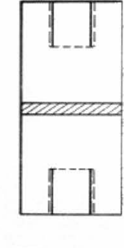


Fig. V-6 a — Éprouvette de cisaillement



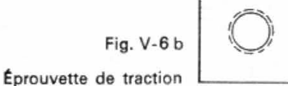
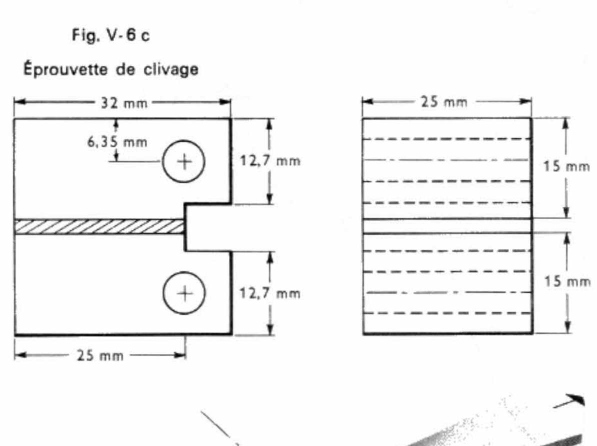


Fig. V-6 b

Éprouvette de traction

Fig. V-6 c

Éprouvette de clivage



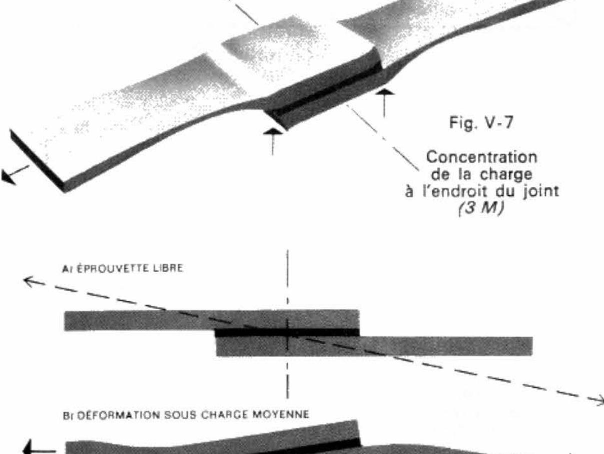


Fig. V-7

Concentration de la charge à l'endroit du joint *(3 M)*

Fig. V-8 — Déformation d'une éprouvette sous charge *(3 M)*

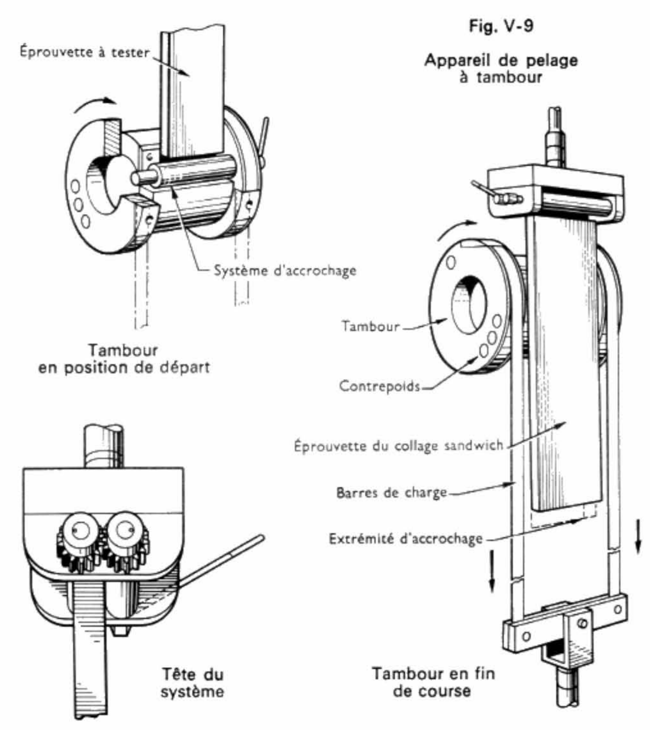


Fig. V-9
Appareil de pelage à tambour

que l'on fait remonter le long d'une éprouvette fixe (fig. V-11). Le moment du couple de pelage exprimé en décanewtons-centimètres par centimètre de large de l'éprouvette est donnée par la formule suivante :

$$T = \frac{(r_0 - r_1)\,F_p}{l}$$

où l'on appelle : F_p la force de pelage (décanewtons) ;
l la largeur de l'éprouvette (centimètres) ;
r_0 le rayon des flasques à demi-épaisseur des sangles (centimètres) ;
r_1 le rayon du tambour + la moitié de l'épaisseur du revêtement (centimètres).

Cette méthode permet de maintenir le même angle de pelage pendant toute la durée de l'essai qui s'effectue à une vitesse linéaire déterminée. Les résultats obtenus sont reproductibles et permettent de contrôler ou de comparer précisément deux colles. Il y a lieu toutefois de bien préciser si les résultats donnés à l'issue de cet essai incluent la force de rupture de l'assemblage et la force de pliage du métal.

Un pelage en T, moins précis, peut être également effectué à des fins de contrôle. L'éprouvette a une forme définie dans la norme ASTM . D1876-6IT.

On peut également effectuer des essais de flexion sur des éprouvettes identiques à celle utilisée pour l'étude du cisaillement. La force est appliquée en un point central, les deux extrémités étant fixes.

Pour donner des ordres de grandeur des différentes valeurs obtenues avec quelques types de colles citées dans ce chapitre, nous reproduisons les graphiques ci-contre (fig. V-12, V-13 et V-14). Toutes ces méthodes d'essais sont finalement coûteuses et il est évident qu'on ne les

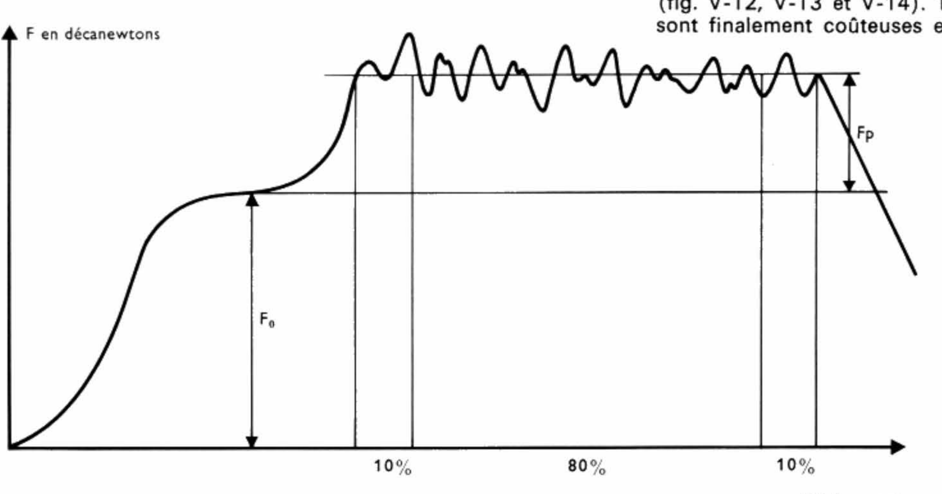


Fig. V-10
Enregistrement type obtenu lors d'un essai de pelage au tambour

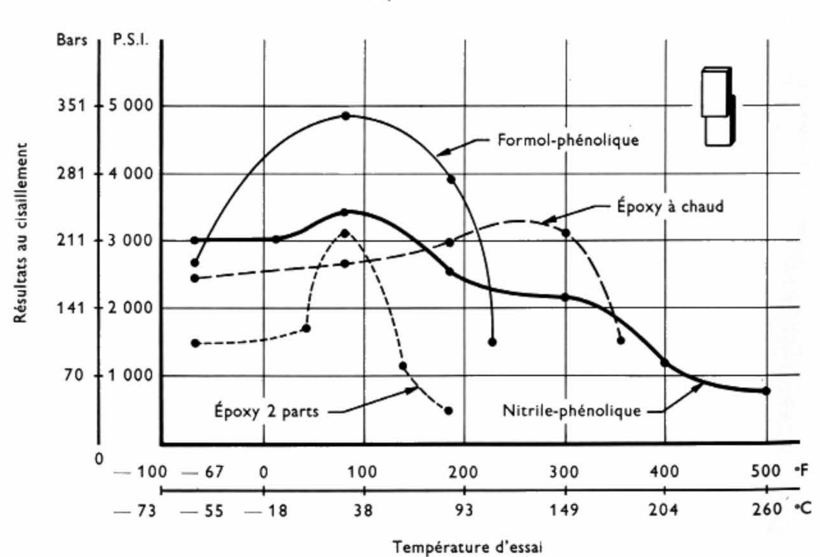


Fig. V-11
Effet de la température sur la résistance au cisaillement de différents types de colles

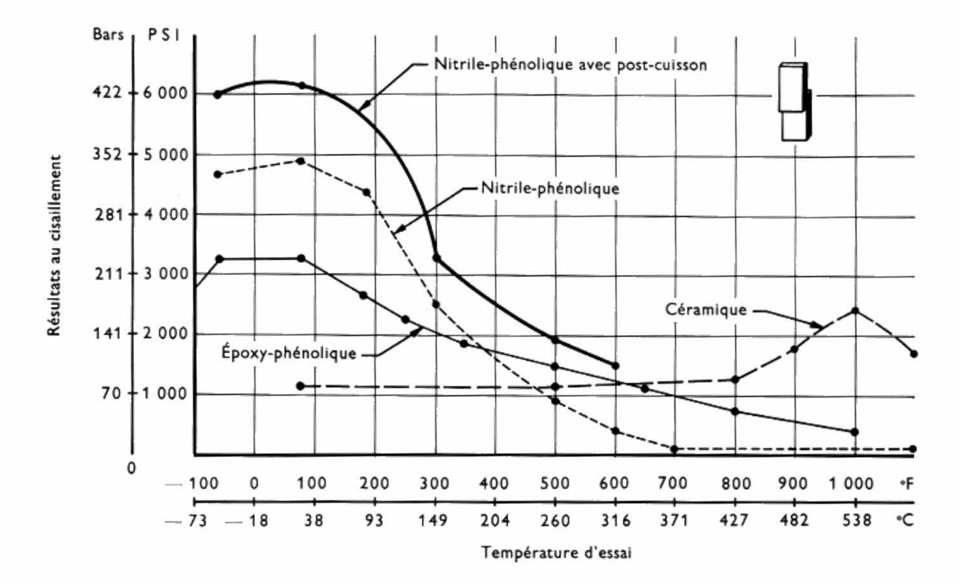


Fig. V-12

Effet de la température sur la résistance au cisaillement de différentes colles



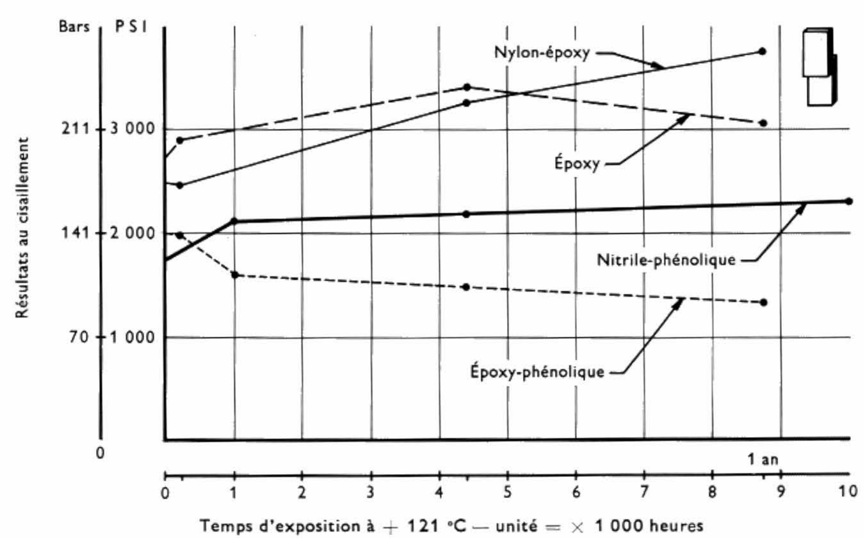


Fig. V-13

Résistance au cisaillement après vieillissement à 121 °C

utilise que dans le cas où l'on exige des résistances mécaniques particulièrement grandes.

En plus des résistances au cisaillement ou au pelage Il est possible de faire des essais de traction, des essais de fatigue où l'on alterne des cycles de cisaillement et de flexion, des essais de glissement sous charge constante. Les essais peuvent s'étendre ainsi à l'infini ; ils sont sélectionnés en fonction des performances désirées.

TABLE DES MATIÈRES

TOME III

MÉCANIQUE DES FLUIDES

Pages

STATIQUE DES FLUIDES 1
Généralités 1
Équilibre des fluides au repos 1
Applications 3
Mesure des densités 5
Mesure des pressions 5
Production des pressions 7

CINÉMATIQUE DES FLUIDES 8
Généralités 8
Principe de la conservation de la masse 9
Étude du mouvement dans le cas général 9
Écoulements simples 9
Les transformations conformes 11

DYNAMIQUE DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES NON VISQUEUX 13
Généralités 13
Équations de la dynamique 13
Interprétation de l'équation de Bernoulli 14
Application de l'équation de Bernoulli 14
Application du théorème des quantités de mouvement 15

DYNAMIQUE DES FLUIDES COMPRESSIBLES NON VISQUEUX 17
Généralités 17
Équations générales 17
Écoulements monodimensionnels 18
Ondes de choc planes 19
Détente de Prandtl-Meyer 21

DYNAMIQUE DES FLUIDES VISQUEUX INCOMPRESSIBLES 21
Définitions et généralités 21
Dynamique des liquides visqueux 23
Dynamique des fluides appliquée à une plaque plane 27

DYNAMIQUE DES FLUIDES EN ÉCOULEMENT NON PERMANENT 30
Généralités 30
Onde progressive et onde de choc 30
Applications 32

AÉRODYNAMIQUE 34
Généralités 34
Aérodynamique des corps et des profils 35
L'avion 38
Aérodynamique des grandes vitesses 40
Aéroélasticité 41

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

GÉNÉRALITÉS 45
But de la résistance des matériaux 45
Hypothèses de base 45
Méthode de résolution des problèmes 46
Sollicitations simples 46

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX 47
Essais mécaniques des matériaux 47
Essai de traction 47
Loi de Hooke 47
Caractéristiques mécaniques 48
Condition de sécurité 48
Coefficient de sécurité 49

EXTENSION ET COMPRESSION 49
Extension 49
Compression 49
Contraintes admissibles (Rp) 49
Applications numériques 49
Parois cylindriques minces 50
Parois cylindriques épaisses 50
Câble d'égale résistance 51

CISAILLEMENT SIMPLE 51
Définition 51
Condition de sécurité 51
Déformation de cisaillement 52
Application numérique 52

FLEXION PLANE SIMPLE 52
Généralités 52
Détermination des contraintes 53
Condition de sécurité 54
Déformation de flexion 54
Moments quadratiques 55
Exemples de calcul 57

Pages
Choix de la section . . . 62
Poutres d'égale résistance . . . 62

TORSION PLANE . . . 63
Généralités . . . 63
Contraintes . . . 63
Angle unitaire de torsion . . . 64
Condition de sécurité . . . 64
Moments quadratiques polaires . . . 64
Application numérique . . . 64

SOLLICITATIONS COMPOSÉES . . . 65
Généralités . . . 65
Flexion et extension ou compression . . . 65
Torsion et extension ou compression . . . 66
Flexion et torsion . . . 66
Flexion déviée simple . . . 66
Compression sous charge excentrée . . . 68
Flexion déviée composée . . . 69

FLAMBAGE DES PIÈCES LONGUES . . . 70
Généralités . . . 70
Condition de sécurité . . . 70

Pages
RESSORTS . . . 71
Généralités . . . 71
Cas du métal sollicité à la torsion . . . 71
Cas du métal sollicité à la flexion . . . 72
Caractéristiques d'un ressort . . . 73
Réalisation des ressorts . . . 73
Types particuliers de ressorts . . . 74

FLEXION DES PLAQUES . . . 74
Généralités . . . 74
Plaque circulaire encastrée . . . 74
Plaque circulaire appuyée . . . 75

PRESSION DE CONTACT . . . 76
Généralités . . . 76
Formules de Hertz . . . 76

MATÉRIAUX PARTICULIERS . . . 79
Généralités . . . 79
Matériaux anisotropes . . . 79
Matériaux hétérogènes . . . 79

TECHNOLOGIE - CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

ÉTUDE DES CONSTRUCTIONS

ASSEMBLAGES À LIAISON COMPLÈTE . . . 85
Assemblages à liaison permanente par rivets . . . 85
Assemblages à liaison démontable . . . 88

ASSEMBLAGES À LIAISON ÉLASTIQUE . . . 96
Ressorts . . . 96
Liaison élastique non métallique . . . 97

GRAISSAGE DES MACHINES . . . 99
Généralités . . . 99
Les lubrifiants . . . 99
Les régimes de graissage . . . 100
Dispositifs et appareils de graissage . . . 102

GUIDAGE EN ROTATION PAR ROULEMENTS . . . 107
Généralités . . . 107
Différents types de roulements . . . 107
Calcul des roulements . . . 110
Lubrification des roulements . . . 112
Étanchéité . . . 114
Surveillance et entretien . . . 114
Exemples de montage . . . 114

TRANSMISSION DU MOUVEMENT CIRCULAIRE . . . 115
Arbres . . . 115
Accouplements . . . 117
Paliers . . . 122
Courroies et convoyeurs à bandes . . . 127
Chaînes . . . 135
Roues de friction . . . 138
Engrenage . . . 140

TRANSFORMATIONS DES MOUVEMENTS . . . 153
Système bielle-manivelle . . . 153
Excentrique et came . . . 162

BÂTIS ET CARTERS . . . 164
Généralités . . . 164
Bâtis moulés . . . 165
Bâtis soudés . . . 173
Bâtis emboutis . . . 175

TUYAUTERIE — ROBINETTERIE . . . 176
Tuyauterie . . . 176
Appareils accessoires de tuyauteries . . . 183
Robinetterie . . . 188

DESSIN TECHNIQUE

GÉNÉRALITÉS . . . 199
Différents types de dessins . . . 200
Matériel du dessinateur . . . 200

CONSTRUCTIONS GÉOMÉTRIQUES . . . 203
Tracés des raccordements . . . 203
Tracés des polygones réguliers . . . 204
Tracés de courbes particulières . . . 204

REPRÉSENTATION EN PERSPECTIVE . . . 206
Perspectives cavalières . . . 206
Perspectives axonométriques . . . 207

CONVENTIONS ET REPRÉSENTATION NORMALISÉE . . . 208
Présentation : écritures normalisées; traits; échelles 208
Projections . . . 209
Coupes et sections . . . 211
Sections planes et intersections de solides de révolution . . . 212
Cotation des dessins . . . 213
Indications de façonnage et tolérances de forme . . . 215
Représentations simplifiées . . . 217
Exemples de dessins . . . 218

THÉORIE ET PRATIQUE DE LA COTATION FONCTIONNELLE . . . 219
Définitions relatives aux tolérances . . . 219
Définitions relatives aux ajustements . . . 219
Relations mathématiques entre les différents termes 219
Calcul des tolérances par la méthode des limites . . . 220
Chaîne de cotes . . . 220
Applications . . . 221
Cotation fonctionnelle des surfaces obliques et des surfaces coniques . . . 222
Assemblages avec pénétration . . . 223
Cotation de la position d'un axe . . . 224
Cotation dite « au maximum de matière » . . . 224
Transfert de cotes . . . 224

REPRODUCTION DES DESSINS . . . 225
Tirages par diazotypie . . . 225
Tirage à la gélatine . . . 227
Autres procédés de reproduction des dessins . . . 228

MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE DE PIÈCES

Pages

GÉNÉRALITÉS SUR LA MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE 229
- Rappel de définitions 229
- Rôle de la métrologie en fabrications mécaniques 231
- Conditions de mesure 231
- Analyse des vérifications effectuées sur une pièce mécanique 232

VÉRIFICATEURS UTILISÉS EN MÉTROLOGIE 233
- Classification 233
- Vérificateurs à traits à dimensions variables 233
- Calibres à limites 237
- Vérificateurs à mesure indirecte par comparaison 238

CONTRÔLES SPÉCIAUX 244
- Généralités 244
- Mesure et contrôle du plan 244
- Contrôle d'une surface conique et d'une pente 246
- Vérification des filetages 248
- Vérification des engrenages 249
- Mesure des rugosités de surface 252
- Vérification géométrique et pratique des machines-outils 255

TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX

MÉTAUX ET ALLIAGES

ÉTAT MÉTALLIQUE ET PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX 259
- Définition de l'état métallique 259
- Structure des métaux 260
- Les alliages 274
- Méthodes de contrôle et d'étude des métaux et alliages 289

ÉLABORATION ET UTILISATION DES MÉTAUX ET ALLIAGES 303
- Méthodes générales d'élaboration des métaux 303
- Méthodes générales de mise en œuvre des métaux 308

MÉTALLURGIES PARTICULIÈRES 312
- Métallurgie du fer 312
- Métallurgie du cuivre 329
- Métallurgie de l'aluminium 334
- Métaux divers 337

CORROSION ET PROTECTION DES MÉTAUX 342
- Les phénomènes de corrosion 342
- Protection contre la corrosion 345

PLASTIQUES

GÉNÉRALITÉS 351

COMPOSÉS MACROMOLÉCULAIRES. PRÉPARATION. STRUCTURE. FORCES DE COHÉSION 351
- Préparation 351
- Configuration des macromolécules 354
- Forces de cohésion 358
- Principaux plastiques commercialisés 358

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, MÉCANIQUES ET CHIMIQUES DES COMPOSÉS MACROMOLÉCULAIRES EN RELATION AVEC LEUR STRUCTURE 359
- Propriétés physiques et mécaniques 359
- Propriétés physico-chimiques liées à la structure 373

PRINCIPALES MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE 377
- Résines thermodurcissables 377
- Résines thermoplastiques 383

LES PRINCIPAUX PLASTIQUES COMMERCIALISÉS-CARACTÉRISTIQUES-LIMITES D'EMPLOI — MÉTHODES PARTICULIÈRES DE MISE EN ŒUVRE — APPLICATIONS 407
- Adjuvants 407
- Monographie 413

AUTRES MATIÈRES PLASTIQUES 433
- Les silicones 433
- Les polyuréthannes 434
- Autres produits 434

CAOUTCHOUCS

- Caoutchouc naturel 437
- Technologie du caoutchouc 439
- Caoutchoucs synthétiques 444
- Aspects économiques 447

ÉLABORATION DES PIÈCES

FORMAGE DIRECT

FONDERIE 451
- Généralités 451
- Modelage 452
- Outillages pour le moulage en grande série 459
- Moulage 465
- Fusion 481
- Appareils pour fusion de la fonte 505
- Appareils pour fusion de l'acier 510
- Opérations après la coulée 511

MÉTALLURGIE DES POUDRES 513
- Généralités 513
- Procédés de fabrication des poudres 514
- Formage par compression à froid des mélanges de poudres 514
- Procédés de mise en forme 514
- Frittage 515
- Fours de frittage 516
- Finition des pièces frittées 516
- Applications 516

FORMAGE MÉCANIQUE

DÉCOUPAGE DES MÉTAUX 519
- Opérations réalisées sur presses (mécaniques ou hydrauliques) 520
- Coupage thermique 524

EMBOUTISSAGE DES MÉTAUX 535
- Généralités 535
- Étude du phénomène 535
- Mesure des contraintes 537

Pages

Possibilités d'emboutissage des métaux 537
Matières d'emboutissage 539
Lubrification 540
Matières pour la construction des outils 540
Outils d'emboutissage et de formage pour pièces de grand encombrement et de formes complexes 541
Étude des méthodes d'emboutissage 543
Emboutissage à chaud 551
Les presses 552

FILAGE PAR CHOC 559
Généralités 559
Étude du filage inverse 560
Étude du filage direct 564
Réduction de section 564
Presses de filage par choc 565
Outillages pour filage par choc 568
Les ébauches de filage par choc 570
Possibilités du filage par choc 572
Applications 573
Conclusion 574

REPOUSSAGE 575
Généralités 575
Matériel 576
Repoussage des différents métaux 577
Exécution des pièces repoussées 579
Repoussage hydraulique 581

CHAUDRONNERIE 585
Structure et analyse d'une industrie 585
Du chaudron au réacteur nucléaire 585
Diversification et spécialisation 588

Pages

Matériaux employés 593
Principaux alliages 593
Critères de choix 593

Travail des tôles 595
Traçage 595
Découpage 595
Pliage 602
Roulage 606

Travail des tubes 609
Préparation des tubes 609
Dudgeonnage des tubes 611
Confection des coudes 611
Tuyauteries industrielles 617

Les entreprises 617
Des techniques et une industrie 617
Moyens de production 617
Nature des fabrications 618

FORGEAGE AU MARTEAU 621
Généralités sur la fabrication des pièces de forge . . . 621
Description des installations 631
Traitements thermiques et usinage 642
Procédés de forgeage particuliers 643
Tendances actuelles de la forge 644

ESTAMPAGE 647
Généralités 647
Matériels 649
Évolutions de l'estampage 660
Conclusion 664

SOUDAGE

Généralités et terminologie 665
Caractéristiques d'emploi et domaines d'application du soudage 666
Procédés de soudage par fusion 666
Procédés exigeant l'intervention d'un effort extérieur 687
Effets métallurgiques des cycles thermiques de soudage 693
Contraintes et déformations dues au retrait de soudage 694
Conception et calcul des constructions soudées . . . 694
Qualité des soudures 694
Brasage 695
Soudo-brasage 695

USINAGE

INTRODUCTION 697
Définition de l'usinage 697
Historique 697

L'USINAGE À LA MAIN 697
Le traçage 697
Les outils d'usinage à main 698

L'USINAGE À LA MACHINE 700
Définition 700
Les mouvements d'une machine-outil 700
Matière constitutive des machines-outils 703
Les études des outils 703
La dynamique de la coupe 710
La lubrification 713

LES MACHINES-OUTILS TRAVAILLANT PAR ENLÈVEMENT DE MÉTAL 714
Généralités 714
Les tours 714
Les machines à fileter à grand rendement 728
Les raboteuses 729
Les étaux-limeurs et les mortaiseuses 730
Les fraiseuses 731
Les perceuses 735
Les aléseuses 737
Les machines à rectifier 739
Les machines à tailler les engrenages 743
Les machines à roder 744
Les machines à brocher 745
Les machines à pointer 746
Les machines auxiliaires 747

LA COMMANDE NUMÉRIQUE ET LES MACHINES SPÉCIALES 747
La commande numérique 747
Les machines spéciales 754

NORMES, QUALITÉS, ORGANISATION ET AVENIR DE L'OUTILLAGE 758
L'analyse de la valeur 758
Le recours à des maisons spécialisées 758
Les études et les recherches 758
Les perspectives d'avenir 759
La qualité d'usinage. Son contrôle 759
La normalisation des outils 760
La qualité des machines-outils 760
L'organisation des fabrications 761
L'avenir de l'organisation des fabrications 764

COLLAGE

Pages

GÉNÉRALITÉS 765
Avantages des collages 765
Limitations 765
Conception des pièces à coller 766

SÉLECTION DES COLLES 768
Adhésion 768
Cohésion 769
Facteurs influençant les caractéristiques de la liaison 769

PRÉPARATION DE SURFACE 769
Préparation mécanique 769
Préparation physique 769
Préparation chimique 770

LES COLLES 771
Paramètres de choix d'une colle 771
Différentes colles 771
Colles structurales 771
Colles non structurales 775

MATÉRIELS DE MISE EN ŒUVRE 776
Matériel d'application 776
Matériel de cuisson ou polymérisation 778
Méthodes de contrôle 779

TABLE DES HORS-TEXTE

	Pages
Reproductions d'un dessin	224
Tolérances de pièces lisses (système ISO)	240
Plastiques	400
Fonderie	464
Découpage-Emboutissage	528
Chaudronnerie	592
Forgeage au marteau	624
Soudage-Usinage	688

Pages de garde

Turbotrain expérimental T GV 001 *(S.N.C.F.)*

Lignes à T.H.T. *(Gilles Ehrmann - É.D.F.)*

IMPRIMÉ ET RELIÉ

POUR LA

LIBRAIRIE ARISTIDE QUILLET

PAR

L'IMPRIMERIE ALSACIENNE JEAN DIDIER

DÉPÔT LÉGAL : JUILLET 1983

N° D'ORDRE ÉDITEUR 183 — N° D'IMPRESSION 83111